



**Joni Gaspar Marques Caracterização Geológica e Tecnológica de
Granitóides do Ceará.**



Joni Gaspar Marques Caracterização Geológica e Tecnológica de Granitóides do Ceará.

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Geomateriais e Recursos Geológicos, realizada sob a orientação científica da Doutora Maria do Rosário Mascarenhas de Almeida Azevedo, Professora Auxiliar do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro (UA – Portugal) e do Doutor José de Araújo Nogueira Neto, Professor Associado I do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará (UFC – Brasil).

Dedico aos meus pais, João e Fernanda

“Pensar é estar doente dos olhos”

Alberto Caeiro, *in* Fernando Pessoa, 1996

o júri

presidente

Professor Doutor Fernando Ernesto Rocha de Almeida
Professor associado da Universidade Aveiro

Professor Doutor Alcides José Sousa Castilho Pereira
Professor associado com agregação da Universidade de Coimbra

Professora Doutora Maria Isabel Gonçalves Fernandes
Professora auxiliar da Universidade do Porto

Professora Doutora Maria do Rosário Mascarenhas de Almeida Azevedo
Professora auxiliar da Universidade de Aveiro

agradecimentos

É verdade, este trabalho marca o término de uma etapa que, ao longo destes anos, teve um interesse e um esforço gradativo da minha parte. Mas não seria possível agarrar-me a esta ciência imensa, que dá pelo nome de Geologia, sem o apoio, a amizade, as conversas, as interações e as experiências que fui tendo com várias pessoas nos mais diversos ambientes. Sem elas não teria chegado onde cheguei e, por isso, não posso deixar de lhes agradecer. Em primeiro lugar um muito obrigado aos meus pais e à minha família pela oportunidade que me permitiram ter e por toda a força e coragem que me deram. Um especial agradecimento pelo acreditar, pelo acompanhamento e pelo tempo despendido comigo por parte dos meus incansáveis pais geológicos, Professora Doutora Maria do Rosário Mascarenhas de Almeida Azevedo (Cuca) e Professor Doutor José de Araújo Nogueira Neto (Zeca). Ao corpo docente da Universidade de Aveiro, Universidade Federal do Ceará, Universidade do Porto, Universidade de Coimbra e Universidade Estadual de São Paulo pelos conhecimentos e aprendizagens partilhadas, destacando-se os Professores Doutores, José Francisco dos Santos, Beatriz Aguado, Maria Helena Mendes, Jorge Medina, Fernando Almeida, Cristina Bernardes, Clóvis Parente, Wagner Amaral, César Veríssimo, Wellington Filho, Otaciél Melo, Christiano Magini, Irani Mattos, Tereza Falcão, Itabaraci Cavalcante, Sônia Vasconcelos, Cynthia Duarte, Michael Souto, Mariano Castelo Branco, Éneas Lousada, Afonso Almeida, Daniel Chagas, Maria dos Anjos, João Coelho, Alexandre Lima, Alcides Pereira e António Carlos Artur. Aos funcionários da Geologia pela ajuda, Senhor Graça, Dona Manuela, Dona Graça, Leal, Valmir, Lobinho, Barbosa, Wellington e Adilson Rossini. Aos cearenses e paulistas pelas lutas de campo, estudo, farras, companheirismo, conselhos e que me receberam de braços abertos, o meu muito obrigado ao Diones “Bgoode”, Cecílio “moreno carente”, Agnaldo “escravo”, Joel, Fernando, Ricardo Braga “Titela”, Ismael Nogueira “Porco”, Ailton “Urso”, Jackson, Fabiano, Nilo Pedrosa “Biritinha”, Caio “ballet”, Eduardo, Karen, Amanda, Allan Bernardino, Thales, Jair Junior, “Renatinha”, Evilarde “o cara”, Fernando Erico “Erikin”, Hélder “Heldim”, Daniela “menina Dani”, Fred, Wollker, Aline Aragão, Juliana Rabelo “Julicana”, Raphaëlle, “Higão”, Elicius, Saulo, Luã Menezes, Livio Rocha, Enoque Neto, Henrique Souza, Marcos Paulo e Italo “os Brothers”, Alex, “Xikin”, Diego Araújo “Neguim”, José Maria “Jack”, Pedro Angelo “pH”, Glória, Martha Lima, Ana Cláudia e família, Débora e Júnior Freire, Fábio Silveira, Naedja Pontes, Talita Gentil, “Pitombeira”, Igor Magalhães “Rapa”, Thiago “cadê a alma?”, Adriano Sampaio “Batata”, Homero, Leonardo, “Papito Junior”, Denin, Fred, Leiliane e Denise. Aos amigos e colegas da UA e da FCUP pelos bons momentos passados, estudos, conversas, mas em especial ao João Dias “Prontos”, Luís Lopes “Luloca”, Willy Alves “Billy” e Fábio Loureiro “Floureiro”, o grupo das “copitas”; Priscila, Ana, Joana, Michigan; Vanessa Carregosa “Tinhas”, Eva “Mokamba”, Fábio Alves “Basco”, Ana João “Pionés”, Tiago Pedrosa, Mariana Rodrigues (Mary Bloom), Diana Dias “Didi”, Ana Aires, Décio Rodrigues, Ricardo Marques “Bob”, Rafa Caprichoso, Fábio Martins “P3”, pessoas com quem se pode partilhar uma casa, uma farra e uma amizade. Claro está, não poderia deixar de dar uma palavra de apreço aos meus amigos de infância “da terrinha”, do ciclo, do secundário, assim como dos Bombeiros Voluntários de Fátima, foi com eles que cresci e aprendi muito ao longo da vida. Não menosprezando as pessoas que não nomeei, de algum modo todos contribuíram para aquilo que sou hoje e para chegar onde cheguei. Para todos vocês um muito obrigado e aqui vai uma vaia cearense: “Yeah”.

palavras-chave

Domínio Ceará Central, Granito Banabuiú, Fácies Serra Branca, Fácies Quixadá, Rochas Ornamentais, Caracterização Geológica, Caracterização Tecnológica, Caracterização Radiométrica.

resumo

Os três granitóides abordados neste trabalho, granito Banabuiú (GB), fácies Quixadá e fácies Serra Branca, pertencem a três batólitos distintos: batólito Banabuiú, batólito Quixadá e batólito Quixeramobim, respectivamente. Estes três batólitos estão inseridos no Domínio Ceará Central (Ceará, Brasil), localizado na Província Borborema. Estes batólitos, segundo dados geocronológicos disponíveis apresentam uma idade Neoproterozóica e de origem associada à orogenia Brasileira (≈ 600 Ma).

A presente investigação tem como objectivos o estudo cartográfico do batólito de Quixeramobim, numa área a sul da cidade de Quixeramobim, e a caracterização tecnológica e radiométrica dos três granitóides supracitados com vista a avaliar o seu potencial interesse para utilização como rocha ornamental.

Para o efeito, foram realizados ensaios tecnológicos e radiométricos: índices físicos, compressão uniaxial simples, flexão em três pontos, desgaste por abrasão *amsler* e velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas ao abrigo das normas da ABNT e ASTM, espectrometria de raio gama e exalação de radão. Também foram efectuadas análises macroscópicas e microscópicas a estes três granitóides a fim de os comparar com os resultados dos ensaios tecnológicos e radiométricos, nomeadamente foram lidos os parâmetros fracturação e microfissuras.

Tendo em conta os dados de campo e petrográficos, elaborou-se um mapa geológico da área em questão e concluiu-se que o batólito de Quixeramobim se divide em sete fácies litológicas. Nomeadamente, da mais antiga para a mais recente: Muxurê Velho, Água Doce, Muxurê Novo, Boa Fé, Serra Branca, Uruquê e Mobilizados Tardios, contactando a NW com a zona de cisalhamento Quixeramobim e com as rochas encaixantes do Grupo Ceará (Unidade Quixeramobim e Unidade Juatama). Concluiu-se igualmente que a exploração comercial como rochas ornamentais é viável.

keywords

Ceará Central Domain, Banabuiú Granite, Serra Branca Facies, Quixadá Facies, Decorative dimension stones, Geology Characterization, Technological Characterization, Radiometric Characterization.

abstract

The three granitoids of this study, Banabuiú granite (GB), Quixadá facies and Serra Branca facies, belong to three distinct batholiths: Banabuiú batholith, Quixadá batholith and Quixeramobim batholith respectively. These three batholiths are inserted in Ceará Central Domain (Ceará, Brazil), located in the Borborema Province. These batholiths, according to geochronological data available show a Neoproterozoic age and origin associated with orogeny Brasiliana (≈ 600 Ma).

The aims of this work are the mapping exercise of Quixeramobim batholith, in an area south of the city of Quixeramobim, and the technological and radiometric characterization of the three granitoid in order to with the objective of evaluate their potential interest to use as ornamental stone.

To that end, the following technological and radiometric assays were performed: physical index, simple uniaxial compression, bending three points, amsler wear by abrasion and speed of propagation of ultrasonic waves under ABNT and ASTM standards, ray spectrometry gamma and radon exhalation. Moreover, macroscopic and microscopic analyses of these three granitoids were performed in order to compare them with the results of technological and radiometric tests, namely were read the parameters discontinuities and microcracks.

To conclude, based on field data and petrographic studies, a geological map of the area was elaborated and it is believed that the Quixeramobim batholith is divided into seven lithological facies. Namely, from the oldest to the newest: *Muxurê Velho*, *Água Doce*, *Muxurê Novo*, *Boa Fé*, *Serra Branca*, *Uruquê e Mobilizados Tardios*, contacting at NW with Quixeramobim shear zone and the host rocks of Ceará group (Quixeramobim Unity and Juatama Unity). Another important finding is that our results prove the economic viability of the commercial exploitation as dimension stone rock.

ÍNDICE GERAL

	Pág.
CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO.....	1
I.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	3
I.2 OBJECTIVOS DO TRABALHO	4
I.3 METODOLOGIA DO TRABALHO	4
I.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	5
CAPÍTULO II: ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO	7
II.1 ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO E ADMINISTRATIVO.....	9
II.2 LOCALIZAÇÃO E ACESSO DA ÁREA CARTOGRAFADA	9
II.3 ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO GERAL.....	12
II.4 DOMÍNIO CEARÁ CENTRAL (DCC)	15
II.4.1 Núcleo Arcaico (NA)	16
II.4.2 Ortognaisses Paleoproterozóicos e rochas supracrustais associadas.....	17
II.4.3 Grupo Ceará	18
II.4.4 Batólito de Santa Quitéria	19
II.4.5 Granitóides Brazilianos	20
II.4.6 Cobertura Fanerozóica	20
II.5 O BATÓLITO DE QUIXERAMOBIM	21
II.5.1 Fácies Muxurê Novo	21
II.5.2 Fácies Serra Branca.....	23
II.5.3 Fácies Muxurê Velho	23
II.5.4 Fácies Água Doce	23
II.5.5 Fácies Uruquê	24
II.5.6 Mobilizados Tardios.....	24
CAPÍTULO III: CARTOGRAFIA GEOLÓGICA E PETROGRAFIA	25

III.1 TRABALHO DE CAMPO	27
III.1.1 Grupo Ceará: Unidade Quixeramobim – Ppcqu	27
III.1.2 Grupo Ceará: Unidade Juatama – Ppcju	35
III.1.3 Batólito Quixeramobim.....	35
III.1.3.1 Fácies Muxurê Velho	39
III.1.3.2 Fácies Água Doce – FAD.....	39
III.1.3.3 Fácies Muxurê Novo – FMN	40
III.1.3.4 Fácies Boa Fé – FBF	40
III.1.3.5 Fácies Serra Branca – FSB	45
III.1.3.6 Fácies Uruquê	45
III.1.3.7 Mobilizados Tardios	45
III.2 PETROGRAFIA.....	46
III.2.1 Encaixante metamórfico (Unidade Quixeramobim)	46
III.2.2 Batólito de Quixeramobim	51
CAPÍTULO IV: ESTUDO DA FRACTURAÇÃO.....	59
IV.1 TRABALHO DE CAMPO	61
IV.2 DESCRIÇÃO DOS AFLORAMENTOS	62
IV.3 ESTUDO DA FRACTURAÇÃO E OBTENÇÃO DE DADOS	64
IV.4 RESULTADOS.....	67
IV.4.1 Estação 1: Pedreira de Banabuiú (E1)	68
IV.4.2 Estação 2: Afloramento da fácies Quixadá (E2).....	70
IV.4.3 Estação 3: Afloramentos da fácies Serra Branca (E3)	71
CAPÍTULO V: MATERIAIS E MÉTODOS	73
V.1 ETAPA PRÉ-CAMPO	75
V.2 ETAPA DE CAMPO	75
V.3 ETAPA PÓS-CAMPO	76
V.3.1 Caracterização Petrográfica	76

V.3.2 Ensaaios laboratoriais	78
V.3.2.1 Índices Físicos (NBR – 15.845, 2010).....	78
V.3.2.2 Resistência à Compressão Uniaxial Simples (NBR – 15.845, 2010).....	79
V.3.2.3 Resistência à Flexão em Três Pontos (NBR – 15.845, 2010).....	80
V.3.2.4 Desgaste por Abrasão Amsler (NBR – 12.042, 1992)	81
V.3.2.5 Velocidade de Propagação de Ondas Ultra-Sônicas (ASTM – D2845/90).....	83
V.3.2.6 Caracterização Radiométrica	83
V.3.2.6.1 Espectrometria de Raios Gama	84
V.3.2.6.2 Exalação de Radão.....	87
V.3.3 Tratamento e Interpretação dos Dados	88
CAPÍTULO VI: CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA E RADIOMÉTRICA .	89
VI.1 SÍNTESE ECONÓMICA DO SECTOR.....	91
VI.2 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA	94
VI.2.1 Caracterização Petrográfica	95
VI.2.2 Caracterização Físico-Mecânica.....	97
VI.2.2.1 Índices Físicos.....	97
VI.2.2.2 Resistência à Compressão Uniaxial Simples.....	99
VI.2.2.3 Resistência à Flexão em Três Pontos.	101
VI.2.2.4 Desgaste por Abrasão <i>Amsler</i>	102
VI.2.2.5 Velocidade de Propagação de Ondas Ultra-Sônicas (m/s)	103
VI.3 CARACTERIZAÇÃO RADIOMÉTRICA.....	105
VI.3.1 Espectrometria de Raios Gama.....	105
VI.3.2 Exalação de Radão	106
CAPÍTULO VII: CONCLUSÕES	109
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Pág.
II.1	Mapa da RF do Brasil ilustrando a divisão em regiões e unidades federativas (<i>extraído de IBGE, 2001</i>)	9
II.2	Mapa simplificado mostrando a localização do município de Quixeramobim no Estado do Ceará e a localização da área cartografada neste estudo	10
II.3	Mapa topográfico da área cartografada	11
II.4	Mapa tectónico simplificado do Brasil, mostrando as grandes unidades geotectónicas que o constituem e a localização da área onde ocorrem os três maciços graníticos em estudo (círculo a vermelho), extraído de Almeida <i>et al.</i> (1981).....	12
II.5	Reconstrução esquemática da parte ocidental do supercontinente Gondwana no final do ciclo Brasileiro (adaptado de Trompette, 1934)	13
II.6	Principais Domínios Tectónicos da Província Borborema no nordeste brasileiro, mostrando a localização dos três maciços graníticos (estrelas, junto ao lineamento de Senador Pompeu), modificado de Almeida <i>et al.</i> (1981), Van schmus <i>et al.</i> (1998), Brito Neves <i>et al.</i> (2000), Cavalcante <i>et al.</i> (2003).....	14
II.7	Domínios Geotectónicos da parte setentrional da Província Borborema (PB), incluindo o Domínio Orós-Jaguaribe (DOJ), mostrando a localização dos três maciços graníticos (estrelas, junto à Zona de Cisalhamento de Orós), segundo Arthaud (2005)	15

II.8	Mapa geológico do Domínio Ceará Central, representando os locais de recolha de amostras (estrelas), adaptado do Mapa Geológico do Ceará de Cavalcante <i>et al.</i> (2003).....	17
II.9	Mapa simplificado mostrando a distribuição das fácies no interior do Batólito de Quixeramobim (modificado de Torquato <i>et al.</i> , 1989 e Almeida, 1995.....	22
III.1	Mapa Geológico da Porção NW do Batólito Quixeramobim	28
IV.1	Pedreira de Banabuiú (Estação 1)	62
IV.2	Afloramento junto a uma bomba de combustível, Quixadá (Estação 2)	62
IV.3	Esquema mostrando os ângulos de direcção, pendor e direcção do pendor de um plano. Extraído de Vallejo <i>et al.</i> (2002).....	64
IV.4	Projecção estereográfica do polo do plano. Extraído de Fossen (2010)	65
IV.5	Espaçamento (linhas verdes) e continuidade (linhas vermelhas) das diaclases	66
IV.6	Diagrama de isodensidades dos pólos das diaclases da pedreira de Banabuiú (E1) e tabela com a orientação média de cada família e dados estatísticos fornecidos pelo programa <i>RockWorks15</i>	68
IV.7	Histograma de frequência dos espaçamentos das diaclases da família 1 na Estação 1	69
IV.8	Histograma de frequência dos espaçamentos das diaclases da família 2 na Estação 1	69
IV.9	Histograma de frequência da continuidade das diaclases da família 1 na Estação 1	69
IV.10	Histograma de frequência da continuidade das diaclases da família 2 na Estação 1	70

IV.11	Diagrama de isodensidades dos pólos das diaclases da Estação 2, ilustrando a definição de apenas uma família de diaclases. Do lado direito, tabela com a orientação média da família e dados estatísticos fornecidos pelo programa <i>RockWorks15</i>	70
IV.12	Histograma de frequência dos espaçamentos das diaclases na Estação 2	71
IV.13	Histograma de frequência relativo à continuidade das diaclases na Estação 2	71
IV.14	Diagrama de isodensidades dos pólos das diaclases dos afloramentos da fácies Serra Branca em Quixeramobim (Estação 3). A tabela mostra a orientação média das duas famílias e alguns dados estatísticos fornecidos pelo programa <i>RockWorks15</i>	72
V.1	Exemplo de tipos de contactos considerados (Extraído de Costa, 2007)	77
V.2	Determinação dos índices físicos: (A) Colocação dos provetes na estufa; (B) Ensaio para o parâmetro submerso	79
V.3	Colocação de provetes na prensa: (A) Antes da aplicação compressão; (B) Após a ruptura (extraído de Silva, 2010)..	80
V.4	Prensa para ensaio de resistência à flexão em 3 pontos (extraído de Silva, 2010)	81
V.5	(A) Medidor da espessura do provete no ensaio de desgaste; (B) Equipamento <i>Amsler</i> , usado no ensaio de desgaste abrasivo	82
V.6	Aparelho para medição da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas (extraído de Godoy & Silva Duarte, 2012).....	83

V.7	Principais fontes de radiação (ICRP 60, 1991).....	84
V.8	(A) Britador de maxilas <i>Retsch</i> ; (B) Quartilha das amostras	86
V.9	Espectrómetro de raios gama da EG & G – ORTEC do Laboratório de Radioactividade Natural do Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra	87
V.10	Detector de radão AlphaGUARD usado para medir os contentores.....	88
VI.1	Variações da taxa de câmbio (Real/Dólar) entre 01/01/2006 e 09/09/2013 (yahoo finanças, 2013)	93
VI.2	Variação mensal das exportações de rochas ornamentais entre 2011 e 2013: (A) em milhões de dólares; (B) em mil toneladas	94
VI.3	Índices de confiança sobre o estado do sector industrial: (A) percentagem; (B) 2002=100	94
VI.4	Valores médios da massa específica aparente, seca e saturada, expressos em g/cm ³ , nos três granitóides. Para efeitos de comparação, projectaram-se também os valores recomendados por Frazão & Farjallat (1995) e os dados dos índices de máficos obtidos na análise petrográfica	98
VI.5	Valores médios da porosidade aparente (%) dos três granitóides. Para efeitos de comparação, projectaram-se também os valores recomendados por Frazão & Farjallat (1995) e os dados dos índices de microfissuramento obtidos na análise petrográfica.	98
VI.6	Valores médios da absorção de água (%) nos três granitóides em estudo. Para efeitos de comparação, projectaram-se também os valores recomendados por	

	Frazão & Farjallat (1995) e os dados dos índices de microfissuramento obtidos na análise petrográfica.	99
VI.7	Resultados dos ensaios de compressão uniaxial simples (MPa) para os três granitóides em estudo. Para efeitos de comparação, projectaram-se também os valores recomendados por Frazão & Farjallat (1995) e os dados de microfissuras.....	100
VI.8	Resultados dos ensaios de flexão em três pontos (MPa) para os granitóides estudados. Para efeitos de comparação, projectaram-se também os valores recomendados por Frazão & Farjallat (1995) e os dados da porosidade aparente.	101
VI.9	Resultados do ensaio de desgaste por abrasão de Amsler (mm) para os granitóides estudados. Para efeitos de comparação, projectaram-se também os valores recomendados por Frazão & Farjallat (1995) e as estimativas das percentagens de minerais máficos e de quartzo	102
VI.10	Valores médios da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas (m/s) nos provetes para ensaio de compressão uniaxial dos três granitóides estudados. Para efeitos de comparação, projectaram-se também os valores recomendados por Frazão & Farjallat (1995) e os dados da porosidade aparente	104
VI.11	Valores médios da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas (m/s) nos provetes para ensaio de resistência à flexão dos três granitóides estudados. Para efeitos de comparação, projectaram-se também os valores recomendados por Frazão & Farjallat (1995) e os dados da porosidade aparente	104

VI.12	Resultados dos ensaios de espectrometria de raios gama. A vermelho, representa-se a actividade de rádio equivalente (Bq/Kg) e a azul, o índice de risco de radiação externa. Para efeitos de comparação, projectaram-se também os valores limite para cada parâmetro (linhas rectas do gráfico).	106
VI.13	Gráfico comparativo da actividade específica do radão (Bq/m³) com as concentrações de U e de Th (ppm).....	108
VI.14	Gráfico comparativo das concentrações de U e de Th (ppm) com a taxa de exalação de radão (Bq/m²/h).....	108

ÍNDICE DE ESTAMPAS

	Pág.
ESTAMPA III.1 – Grupo Ceará: Unidade Quixeramobim	31
Fot. III.1 – Afloramento de paragnaisse migmatizado (MJM-153). Coordenadas UTM: 464263mE/9422010mN.....	31
Fot. III.2 – Leucossomas em paragnaisse migmatizado (RGD-54). Coordenadas UTM: 463937mE/9419950mN.....	31
Fot. III.3 – Granada em leucossoma de paragnaisse migmatizado (MJM-156). Coordenadas UTM: 464357mE/9423270mN	31
ESTAMPA III.2 – Grupo Ceará: Unidade Quixeramobim	33
Fot. III.4 – Micaxistos intercalados em paragnaisse (MJM-156). Coordenadas UTM: 464357mE/9423270mN.....	33
Fot. III.5 – Corpo lenticular de mármore associado a pegmatito (MJM-152). Coordenadas UTM: 464844mE/9421700mN	33
Fot. III.6 – Blocos de quartzito rolado da Unidade Quixeramobim (MJM-149). Coordenadas UTM: 464372mE/9420986mN	33
ESTAMPA III.3 – Grupo Ceará: Unidade Juatama	37
Fot. III.7 – Metatexito estromático milonitizado (RGD-60). Coordenadas UTM: 466172mE/9420488mN.....	37
Fot. III.8 – Pormenor de um metatexito estromático mostrando a alternância de leucossomas e bandas escuras (RGD-63). Coordenadas UTM: 466458mE/9423226mN.....	37
Fot. III.9 – Diatexito (RGD-55). Coordenadas UTM: 469616mE/ 9420134mN.....	37
ESTAMPA III.4 – Batólito Quixeramobim.....	41
Fot. III.10 – Pormenor da fácies Muxurê Velho na fácies Serra Branca (RGD-05). Coordenadas UTM: 465048mE/9417714mN	41
Fot. III.11 – Encraves da fácies Muxurê Velho (mais escuro) na fácies Muxurê Novo (MJM-74). Coordenadas UTM: 467537mE/941538mN.....	41
Fot. III.12 – Encrave da fácies Muxurê Velho (mais escuro) com fenocristais de feldspato, na fácies Serra Branca (RGD-4). Coordenadas UTM: 465559mE/9417534mN.....	41

ESTAMPA III.5 – Batólito Quixeramobim.....	43
Fot. III.13 – Afloramento da fácies Água Doce (MJM-75). Coordenadas UTM: 467765mE/9415992mN.....	43
Fot. III.14 – Afloramento da fácies Muxurê Novo (MJM-137). Coordenadas UTM: 468972mE/9423756mN.....	43
Fot. III.15 – Afloramento da fácies Boa Fé, mostrando foliação de fluxo magmático (RGD-20) Coordenadas UTM: 468289mE/9420280mN.....	43
ESTAMPA III.6 – Batólito Quixeramobim.....	48
Fot. III.16 – Fenocristal de feldspato com inclusões de biotite e anfíbola num afloramento da fácies Serra Branca (MJM-51). Coordenadas UTM: 464285mE/9416462mN.....	48
Fot. III.17 – Acumulação de fenocristais de feldspato na fácies Serra Branca – <i>filter pressing</i> (MJM-48). Coordenadas UTM: 464932mE/9417356mN.....	48
Fot. III.18 – Fácies Serra Branca com encrave da fácies Muxurê Velho (mais escuro), cortado por dique da fácies Uruquê (mais claro) (MJM-48). Coordenadas UTM: 464932mE/9417356mN.....	48
ESTAMPA III.7 – Batólito Quixeramobim.....	49
Fot. III.19 – Apófises da fácies Uruquê (mais clara) na fácies Água Doce (MJM-77). Coordenadas UTM: 468092mE/9415886mN.....	49
Fot. III.20 – Fácies Serra Branca cortada por dique da fácies Uruquê (vermelho). Dique pegmatítico (amarelo) cortando ambas as fácies (MJM-48). Coordenadas UTM: 464932mE/9417356mN	49
Fot. III.21 – Veio pegmatítico com feldspato no bordo e quartzo no núcleo, intrusivo na fácies Água Doce (MJM-78). Coordenadas UTM: 468308mE/9415960mN.....	49
ESTAMPA III.8 – Encaixante Metamórfico (Unidade Quixeramobim)	55
Fot. III.22 – Bandado gnáissico em paragnaisse da Unidade Quixeramobim.....	55
Fot. III.23 – Cristais de feldspato potássico com sombras de pressão (vermelho)	55

Fot. III.24 – Intercrescimentos mirmequíticos em paragnaisse da Unidade Quixeramobim.....	55
Fot. III.25 – Secção de clinopiroxena (diópsido) em rocha calco-silicatada	55
Fot. III.26 – Cristais de plagioclase e quartzo em rocha calco-silicatada	55
Fot. III.27 – Granada poiquiloblástica com inclusões de clinopiroxena em rocha calco-silicatada.....	55
ESTAMPA III.9 – Batólito Quixeramobim.....	57
Fot. III.28 – Cristais de plagioclase, quartzo e epídoto (com um núcleo de alanite) numa amostra da fácies Água Doce	57
Fot. III.29 – Cristal euédrico de esfena primária, associado a biotite e apatite (fácies Água Doce).	57
Fot. III.30 – Fenocristal de feldspato potássico pertítico com macla de Carlsbad (fácies Muxurê Novo)	57
Fot. III.31 – Secção basal de anfíbola em contacto com microclina (fácies Muxurê Novo).....	57
Fot. III.32 – Agregados de grãos de epídoto na fácies Muxurê Novo...	57
Fot. III.33 – Aspecto geral de lâmina delgada de um granito tardio evidenciando uma microclina.....	57

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela	Pág.
II.1 Coordenadas UTM (metros) dos vértices do polígono que delimita a área de estudo.....	12
IV.1 Coordenadas UTM WGS 84 dos locais de estudo.....	61
IV.2 Classificação do grau de meteorização dos maciços rochosos (ISRM, 1981).....	64
IV.3 Descrição do espaçamento (Vallejo <i>et al.</i> , 2002).....	66
IV.4 Descrição da continuidade (ISRM, 1981).....	67
IV.5 Descrição da abertura (ISRM, 1981)	67
V.1 Classificação de rochas quanto à resistência à compressão uniaxial (ISRM, 1977).....	80
V.2 Valores recomendados do índice de concentração de actividade gama (I) e da dose efectiva gama para diferentes tipos de utilização (extraído de European Commission, 1999).....	85
VI.1 Variação da taxa de crescimento das exportações brasileiras de rochas ornamentais entre 2006 e 2010 (extraído de ABIROCHAS, 2010)	93
VI.2 Tabela resumindo as características petrográficas das amostras	96
VI.3 Valores médios da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água nos três granitóides estudados. Na última coluna indicam-se os valores recomendados por Frazão & Farjallat (1995) e pela norma ASTM C-615 (1992).....	98
VI.4 Resultados dos ensaios de resistência à compressão uniaxial simples para os três granitóides estudados. Na última coluna indicam-se os valores recomendados por Frazão & Farjallat (1995) e pela norma ASTM C-615 (1992)...	100

VI.5	Resultados dos ensaios de resistência à flexão para os três granitóides estudados. Na última coluna indicam-se os valores recomendados por Frazão & Farjallat (1995) e pela norma ASTM C-615 (1992)	101
VI.6	Resultados dos ensaios de desgaste por abrasão <i>Amsler</i> para os granitóides estudados. Indicam-se também os valores recomendados por Frazão & Farjallat (1995) e pela norma ASTM C-615 (1992)	102
VI.7	Velocidades de propagação de ondas ultra-sónicas (m/s) nos granitóides estudados. Indicam-se também os valores recomendados por Frazão & Farjallat (1995) e pela norma ASTM C-615 (1992)	103
VI.8	Resultados dos ensaios de espectrometria de raios gama...	105
VI.9	Resultados dos ensaios da concentração da exalação do radão	107

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO

A dissertação para a obtenção do título de mestre em Geomateriais e Recursos Geológicos (2º Ciclo de Estudos) da Universidade de Aveiro / Universidade do Porto que aqui se apresenta intitula-se “*Caracterização Geológica e Tecnológica de Granitóides do Ceará*”. Com esta investigação pretendeu-se caracterizar três maciços de granitóides Brasileiros que afloram no estado de Ceará e, simultaneamente, avaliar em que medida essas rochas satisfazem os requisitos necessários para futura exploração como rochas ornamentais.

Nesta nota introdutória, faz-se uma breve referência à importância do sector de rochas ornamentais na economia do Brasil, enunciam-se os principais objectivos da tese e descrevem-se metodologias aplicadas durante a execução do trabalho.

I.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Desde a Revolução Industrial, que começou em Inglaterra em meados do século XVIII, que se assiste a uma explosão do crescimento populacional. Segundo a ONU, existiam em 1960 cerca de 3 bilhões de pessoas em todo o mundo. De acordo com as projecções populacionais, este valor continua a crescer a um ritmo sem precedentes, prevendo-se que este ano a população do planeta atinja cerca de 7,2 bilhões e, em 2050, cerca de 9,6 bilhões de habitantes. Com o crescimento demográfico, tem aumentado também a procura de recursos geológicos, em geral, e das rochas ornamentais, em particular.

O Brasil é um dos países onde a população tem crescido mais. Na década de 60, o país tinha cerca de 70 milhões de habitantes e, em 2013, a sua população atingirá cerca de 201 milhões (ONU). Como resultado de uma procura crescente de rochas ornamentais (nomeadamente de granitos), tanto a nível interno como externo, este sector produtivo tem-se desenvolvido muito nas últimas décadas. Para além da actividade extrativa, expandiu-se também a capacidade de produção do sector de beneficiamento, com a instalação de novos teares e o país começou a penetrar de forma cada vez mais agressiva no competitivo mercado de produtos processados. Por isso, o Brasil é actualmente uma das principais economias do mundo no sector das rochas ornamentais.

O notável potencial geológico do país, aliado à existência de boas infra-estruturas de transporte das áreas produtoras para os pólos de processamento e de colocação de produtos têm contribuído decisivamente para a expansão do sector. Por outro lado, os avanços tecnológicos permitiram aperfeiçoar as técnicas e equipamentos de extração, desdobramento, corte e polimento, o que se traduziu em significativos ganhos de

produtividade nas diferentes etapas do processo produtivo, com consequente redução de custos e aumento de competitividade.

Por fim, as acções de incentivo à pesquisa, desenvolvimento e gestão de recursos por parte dos Serviços Geológicos do Brasil (CPRM) e do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) são outros dos factores que mais têm potenciado a dinamização do sector das rochas ornamentais. É de realçar ainda que a redução de impostos de importação e a simplificação dos processos administrativos permitiram criar condições mais favoráveis para o desenvolvimento deste importante sector produtivo.

I.2 OBJECTIVOS DO TRABALHO

Apesar de existirem numerosos trabalhos publicados sobre as características petrográficas, geoquímicas e isotópicas dos granitóides Brasileiros de Banabuiú, Quixadá e Quixeramobim, os estudos sobre a sua potencial aplicação como rochas ornamentais são muito escassos. Tendo em conta que a prospecção deste tipo de recursos naturais devem ter por base um conhecimento geológico detalhado das unidades em avaliação e uma análise criteriosa das suas propriedades geomecânicas, definiram-se os seguintes objectivos principais para a presente investigação:

1. Obter informação de campo sobre os três maciços e proceder à cartografia detalhada, na escala de 1:25.000, de uma parte do batólito de Quixeramobim (com uma área de 55 km²);
2. Realizar estudos de fracturação e microfissuramento em afloramentos seleccionados dos três maciços;
3. Descrever petrograficamente amostras representativas dos três complexos intrusivos;
4. Caracterizar tecnologicamente e radiometricamente as amostras colhidas;
5. Analisar as potencialidades de cada um dos granitóides estudados para exploração como rochas ornamentais.

I.3 METODOLOGIA DO TRABALHO

As actividades desenvolvidas durante o período de preparação da tese incluíram as seguintes etapas fundamentais:

1. Pesquisa bibliográfica. A pesquisa bibliográfica envolveu, numa fase inicial, a consulta de mapas geológicos e de inúmeras publicações para recolha de toda a informação disponível sobre os três maciços e litologias

envolventes e, numa fase posterior, para aprofundamento de conhecimentos sobre alguns dos temas abordados;

2. Trabalho de campo, que compreendeu: (a) o reconhecimento geológico dos afloramentos em que foram colhidas amostras dos três granitóides, (b) a caracterização macro- e mesoscópica destes afloramentos, (c) a obtenção de dados estruturais, (d) amostragem e (e) registo fotográfico. No caso do Batólito de Quixeramobim, incluiu ainda a cartografia, na escala 1:25.000, de um sector do maciço, com uma área de 55 km²;
3. Estudo petrográfico de um conjunto de amostras representativas dos diferentes tipos de granitóides. A caracterização petrográfica envolveu essencialmente a identificação das paragénese ígneas de cada uma das unidades estudadas e a sua descrição textural;
4. Caracterização tecnológica e radiométrica, que incluiu preparação dos provetes, a realização de ensaios físico e físico-mecânicos e a obtenção de dados radiométricos;
5. Tratamento e interpretação dos dados obtidos;
6. Redacção do documento final (Dissertação/Tese).

Para além do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro e do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará, a investigação realizada contou com o apoio dos seguintes laboratórios: (a) Laboratório de Preparação de Lâminas do Instituto de Geociências da Universidade Estadual Paulista (IGCE-UNESP) em Rio Claro (Estado de São Paulo) para confecção de lâminas delgadas, (b) Laboratório de Rochas Ornamentais do Departamento de Petrologia e Metalogenia (LRO-DPM) da Universidade Estadual Paulista (UNESP) em Rio Claro para a realização de ensaios físico-mecânicos e (c) Laboratório de Radioactividade Natural do Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra (LRN-DCTUC) para obtenção de dados radiométricos.

I.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Além deste capítulo introdutório, este trabalho inclui mais seis capítulos organizados da seguinte forma:

- **Capítulo II – Enquadramento Geológico**

Neste capítulo é feito um enquadramento geológico geral da área cartografada com base na bibliografia existente.

- **Capítulo III – Cartografia Geológica e Petrografia**

O capítulo III é constituído por duas partes. Na primeira, apresentam-se as descrições de campo e o mapa elaborado durante esta investigação, acompanhados por fotografias, enquanto a segunda inclui os dados da análise petrográfica das amostras colhidas, documentados por fotografias de microscópio.

- **Capítulo IV – Estudo da Fracturação**

No capítulo IV descrevem-se os afloramentos em que foram obtidos dados estruturais sobre padrões de fracturação e apresentam-se os resultados obtidos.

- **Capítulo V – Materiais e Métodos**

Neste capítulo são descritas as várias técnicas e procedimentos analíticos aplicados, assim como os materiais utilizados nesta investigação.

- **Capítulo VI – Caracterização Tecnológica e Radiométrica**

Este capítulo inicia-se com uma breve descrição sobre a situação do sector de rocha ornamentais no Brasil. Em seguida apresentam-se e discutem-se os resultados da caracterização petrográfica, físico-mecânica e radiométrica.

- **Capítulo VII – Conclusões**

No capítulo VII, apresentam-se as principais conclusões do trabalho realizado.

- **Referências Bibliográficas**

CAPÍTULO II:

ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO

CAPÍTULO II: ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO

Neste capítulo enquadra-se a área em que afloram os maciços graníticos de Quixeramobim, Quixadá e Banabuiú em termos geográficos, administrativos e geológicos. Descrevem-se sumariamente as principais características litoestratigráficas, tectono-metamórficas e magmáticas do sector nordeste do território brasileiro, dando ênfase aos aspectos de interesse para o tema em investigação.

II.1 ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO E ADMINISTRATIVO

O mapa da República Federativa (RF) do Brasil representado na Figura II.1, mostra as cinco regiões administrativas (Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul) e as respectivas Unidades Federativas (UF) em que se subdivide o território brasileiro, perfazendo um total de 27 Estados (UF).



Figura II.1 – Mapa da RF do Brasil ilustrando a divisão em regiões e unidades federativas (extraído de IBGE, 2001).

II.2 LOCALIZAÇÃO E ACESSO DA ÁREA CARTOGRAFADA

A área que foi cartografada no âmbito do presente estudo insere-se na região Nordeste do Brasil e faz parte do município de Quixeramobim que se encontra no centro

do Estado do Ceará. A cidade de Quixeramobim é conhecida como “Coração do Ceará” porque o centro geodésico do Estado se situa nesta localidade, estando assinalado por um obelisco, com cerca de 10 metros de altura (Fig. II.2). O município de Quixeramobim é limitado, a este, pelos municípios de Quixadá, Banabuiú e Choró, a norte, pelo município Madalena, a sul; pelos municípios de Senador Pompeu, Solonópole e Pedra Branca e, a oeste, pelo município Boa Viagem.

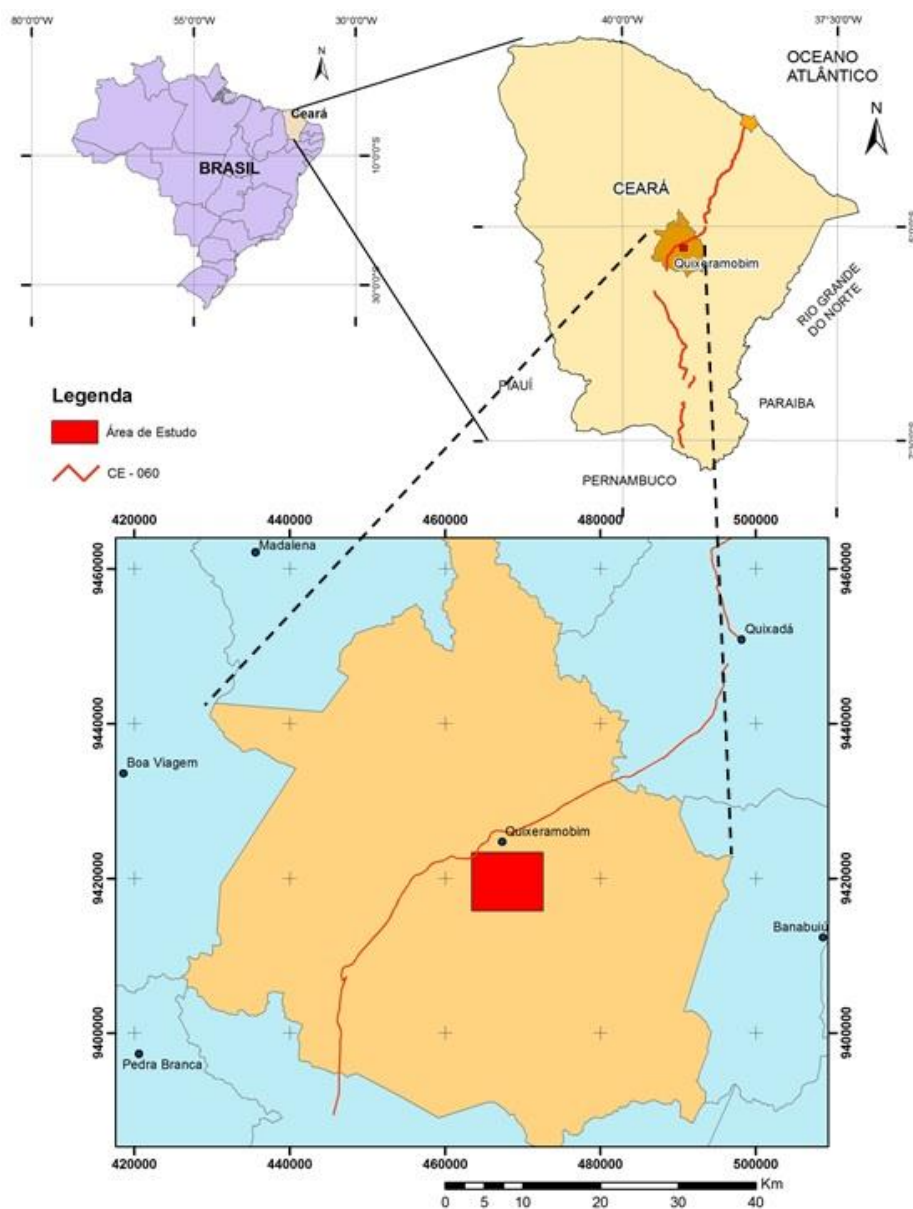


Figura II.2 – Mapa simplificado mostrando a localização do município de Quixeramobim no Estado do Ceará e a localização da área cartografada neste estudo.

Com uma elevação média de cerca de 190 metros e uma área de 3.275,625 km² (IBGE), o município de Quixeramobim é uma vasta região aplanada em que sobressaem

alguns relevos residuais. Tem uma população de 71.887 habitantes (Censo de 2010) e é coberta pelas cartas topográficas de Quixeramobim (SB.24-V-D-III), Senador Pompeu (SB.24-V-D-VI), Banabuiú (SB.24-X-C-I), Boa Viagem (SB.24-V-D-II) e Quixadá (SB.24-V-B-VI).

A uma distância de cerca de 183 km (em linha recta) da capital estadual Fortaleza, o principal acesso a este município faz-se através da rodovia federal BR-116, no sentido sul, até Chorozinho e pela BR-112, desde Chorozinho até Quixeramobim. Em alternativa, também se pode usar a rodovia federal BR-020 até Madalena e seguir por uma das estradas estaduais (CE-166) até Quixeramobim. As principais estradas estaduais que servem o município de Quixeramobim são: CE-166, CE-266 e CE-060.

O trabalho de cartografia geológica realizado durante a presente investigação incidiu sobre uma pequena área, com uma extensão de cerca de 55 km², localizada a sul da sede municipal de Quixeramobim (Figs. II.2 e II.3).

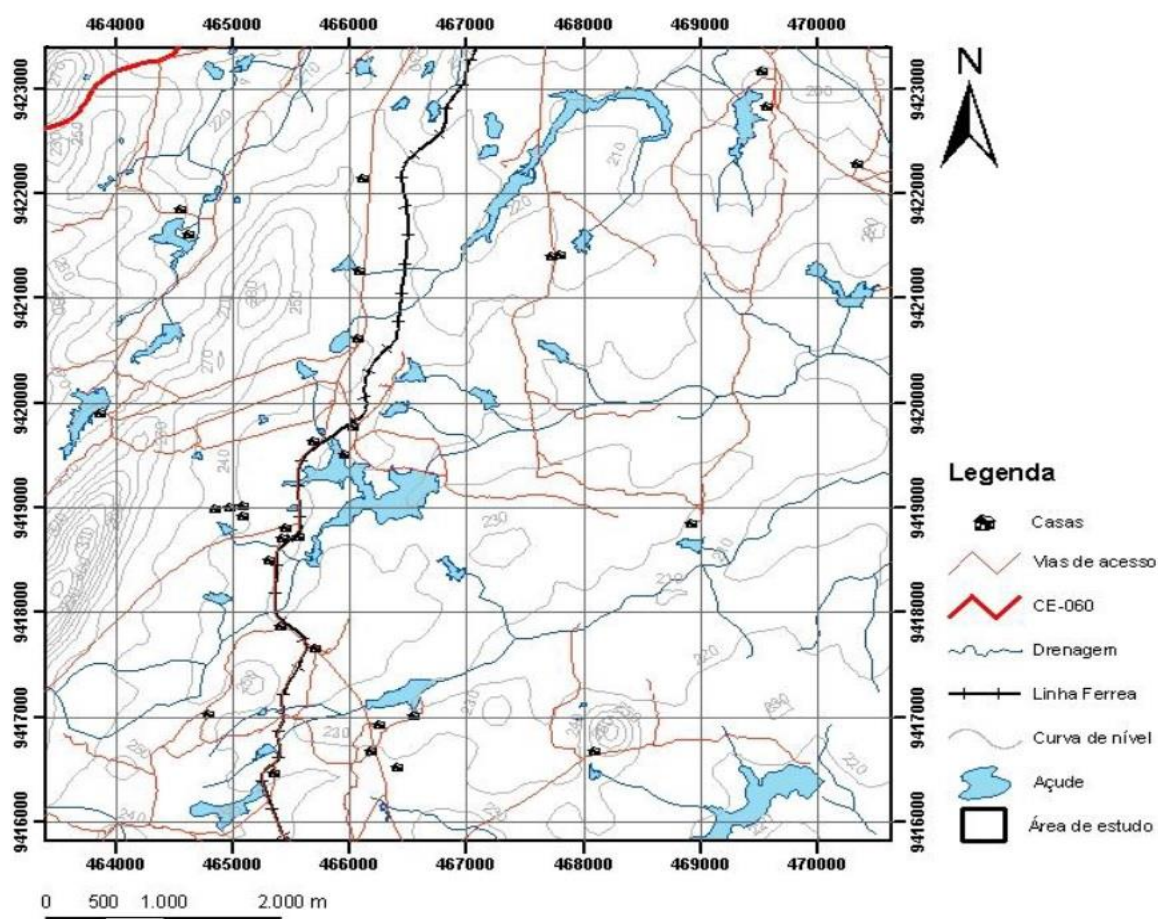


Figura II.3 – Mapa topográfico da área cartografada.

O sector tem uma forma quase quadrada. As coordenadas UTM dos seus vértices estão indicadas na Tabela II.1. Tendo a cidade de Quixeramobim como ponto de partida,

o acesso à região pode ser feito pelas estradas estaduais CE-060 (sentido sudoeste) ou CE-166 (sentido sul) e várias estradas secundárias.

Tabela II.1 – Coordenadas UTM (metros) dos vértices do polígono que delimita a área de estudo.

Coordenadas UTM	Vértices do polígono			
	Superior esquerdo	Superior direito	Inferior esquerdo	Inferior direito
X (m)	463398	470639	463398	470639
Y (m)	9423397	9423397	9415800	9415800

II.3 ENQUADRAMENTO GEOLÓGICO GERAL

Do ponto de vista geológico, a região em que ocorrem os maciços graníticos de Quixeramobim, Quixadá e Banabuiú localiza-se numa das grandes unidades geotectónicas em que se subdivide o território brasileiro - a Província Borborema (PB) (Fig. II.4). Contrariamente aos terrenos precâmbrios dos cratões de São Francisco, Amazónico, São Luiz e Rio de la Plata (Fig. II.4), a Província Borborema, em conjunto com as Províncias de Mantiqueira e Tocantins representam domínios intensamente afectados pelos movimentos orogénicos associados ao ciclo Brasileiro/Pan-Africano, no Neoproterozóico.

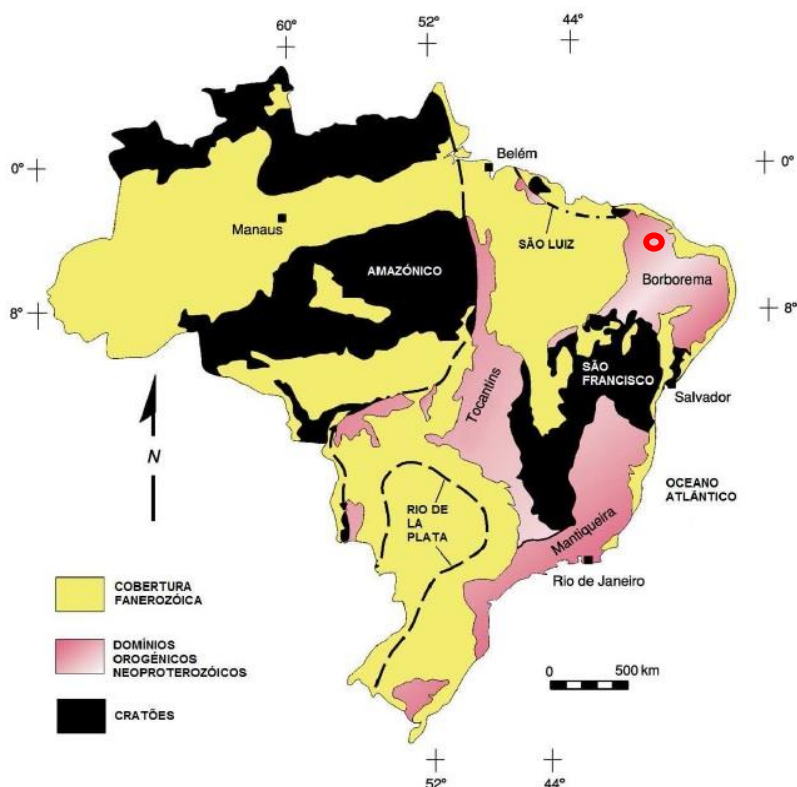


Figura II.4 - Mapa tectónico simplificado do Brasil, mostrando as grandes unidades geotectónicas que o constituem e a localização da área onde ocorrem os três maciços graníticos em estudo (círculo a vermelho), extraído de Almeida et al. (1981).

Com efeito, a Província Borborema corresponde a uma faixa móvel formada no Neoproterozóico, como resultado da colisão entre os cratões São Luiz-Oeste Africano e São Francisco-Congo-Kasai (Van Schmus *et al.*, 1997; Figura II.5).

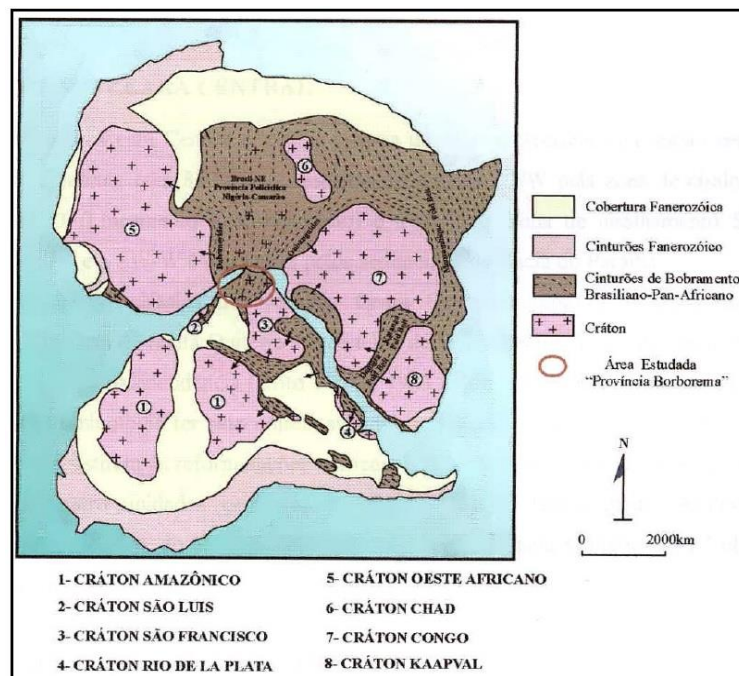


Figura II.5 – Reconstrução esquemática da parte ocidental do supercontinente Gondwana no final do ciclo Brasileiro (adaptado de Trompette, 1994).

Durante a orogenia Brasileira, desenvolveram-se na Província Borborema importantes zonas de cisalhamento dúctil, de escala continental, com carácter predominantemente transcorrente e orientações variando entre NE-SW, NNE-SSW e E-W (Vauchez *et al.*, 1995). Alguns destes cisalhamentos segmentam a PB em domínios com características estratigráficas, tectónicas, metamórficas e magmáticas distintas e permitiram individualizar três grandes sectores na Província Borborema: (1) o Domínio Norte ou Setentrional, localizado a norte do Lineamento de Patos; (2) o Domínio Transversal ou Central, delimitado pelos Lineamentos de Patos e Pernambuco e (3) o Domínio Sul ou Meridional, situado a sul do Lineamento de Pernambuco (e.g. Van Schmus *et al.*, 1995; Brito Neves *et al.*, 2000; Santos *et al.*, 2001).

O Domínio Setentrional, onde afloram os três maciços de granitóides que foram objecto deste estudo, foi ainda subdividido em três subdomínios: (a) Domínio Médio Coreau (DMC), situado a NW do lineamento Transbrasiliano ou Sobral-Pedro II; (b) Domínio Ceará Central (DCC), localizado entre os lineamentos de Transbrasiliano e Senador Pompeu e (c) Domínio Rio Grande do Norte (DRGN), limitado pelos lineamentos de Senador Pompeu e Patos (Fetter *et al.*, 2000; Brito Neves *et al.*, 2000).

No mapa da Figura II.6, representam-se os diferentes domínios da PB e assinala-se a localização dos três maciços investigados.

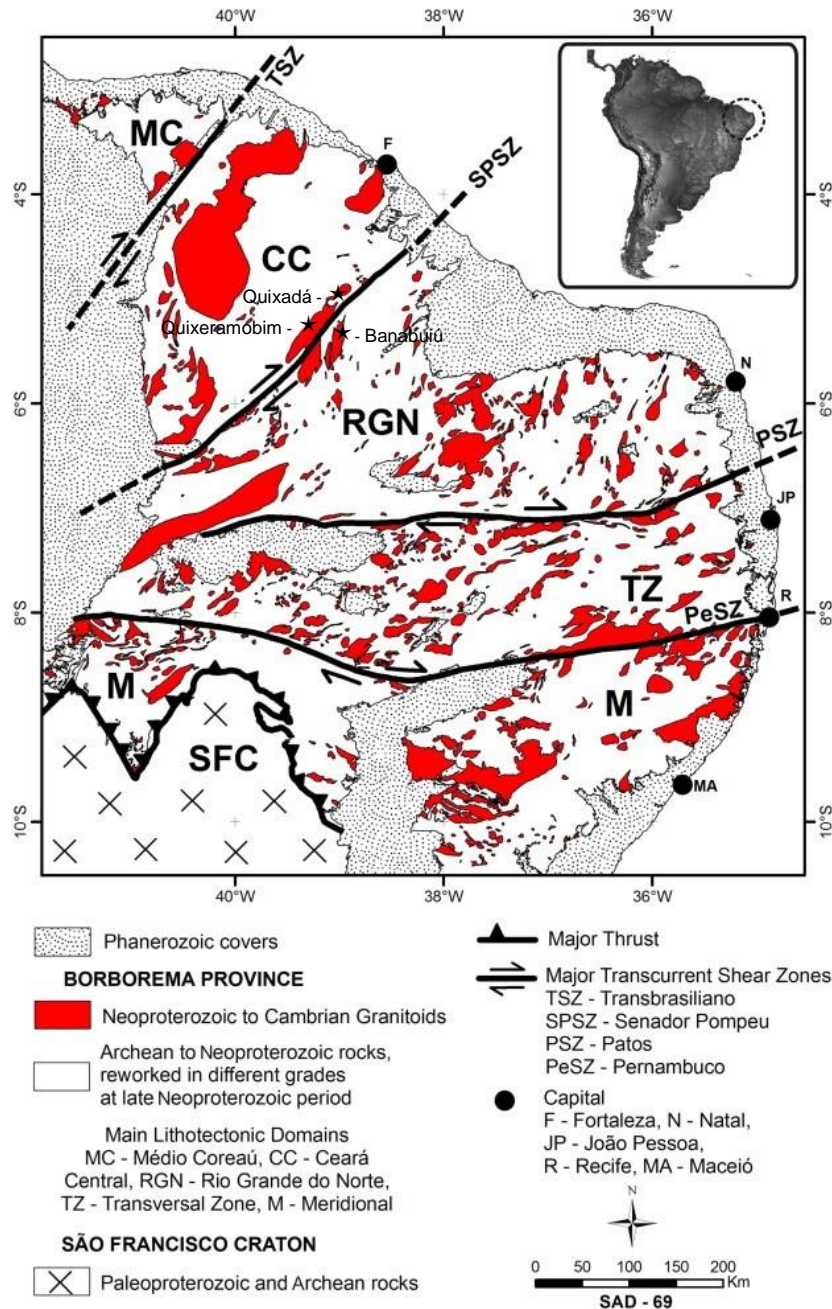


Figura II.6 – Principais Domínios Tectônicos da Província Borborema no nordeste brasileiro, mostrando a localização dos três maciços graníticos (estrelas, junto ao lineamento de Senador Pompeu), modificado de Almeida et al. (1981), Van Schmus et al. (1998), Brito Neves et al. (2000), Cavalcante et al. (2003).

De acordo com o mapa da Figura II.6., o granito de Banabuiú integra-se no DRGN. No entanto, Arthaud et al. (1998) e Arthaud (2005) incluem o sector situado a oeste da Zona de Cisalhamento de Orós (Fig. II.7) no DCC e definem um novo domínio,

designado por Orós-Jaguaribe (DOJ), entre o DCC e o DRGN. O DOJ é limitado pelo DCC, a oeste, através das Zonas de Cisalhamento de Orós e de Aiuába, e pelo DRGN, a este, através das Zonas de Cisalhamento de Farias Brito e de Porto Alegre (Fig. II.7).

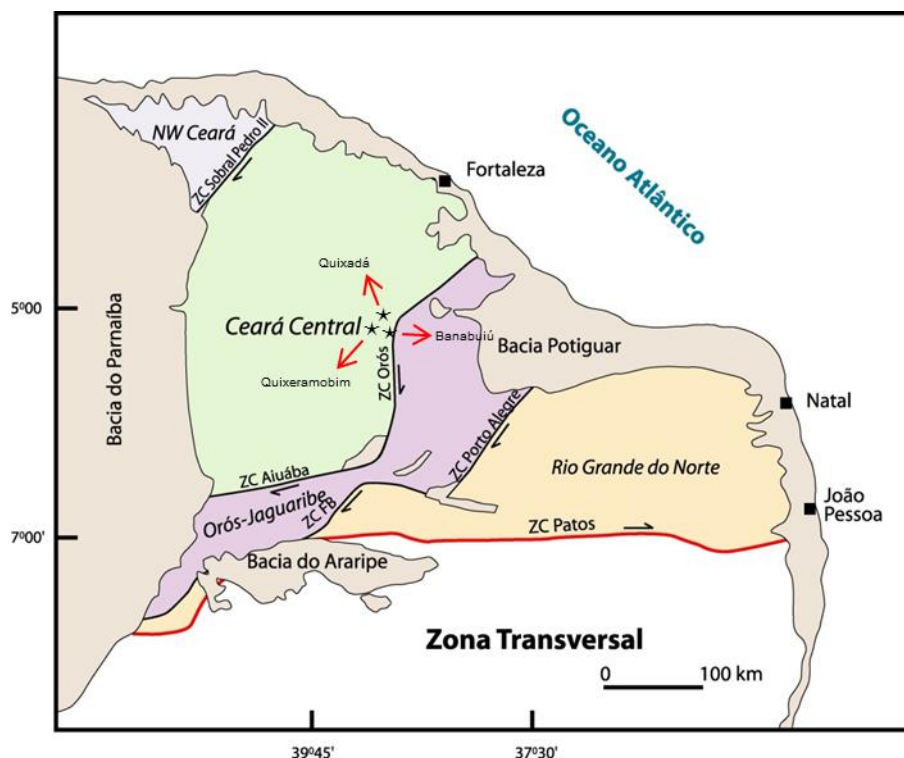


Figura II.7 – Domínios Geotectónicos da parte setentrional da Província Borborema (PB), incluindo o Domínio Orós –Jaguaribe (DOJ), mostrando a localização dos três maciços graníticos (estrelas, junto à Zona de Cisalhamento de Orós), segundo Arthaud (2005).

Apesar desta subdivisão não ser consensual, as estreitas afinidades litoestratigráficas entre as unidades geológicas que ocorrem no DCC e na área envolvente do granito de Banabuiú, levaram a tratar este sector como parte integrante do do DCC.

II.4 DOMÍNIO CEARÁ CENTRAL (DCC)

Estando os granitóides em estudo essencialmente inseridos no Domínio Ceará Central – DCC (Figs. II.6 e II.7), far-se-á em seguida uma descrição mais detalhada deste sector. O DCC é limitado, a norte, pela Província Costeira, a noroeste, pela zona de cisalhamento dextra Sobral-Pedro II, interpretada por Trompette (1994) como o prolongamento no Brasil da sutura entre os cratões Oeste Africano e Congo, a oeste, pelas rochas sedimentares da Bacia do Parnaíba e, a este e sul, pelas Zonas de Cisalhamento de Orós e de Aiuába (Arthaud *et al.*, 1998 e Arthaud, 2005; Fig. II.7).

De acordo com trabalhos recentes, os materiais presentes no DCC podem ser agrupados nas seguintes unidades (Figura II.8): (1) Núcleo Arcaico; (2) Ortognaisses Paleoproterozóicos e rochas supracrustais associadas (Série Algodões e Grupo Acopiara); (3) Sequências sedimentares supracrustais Neoproterozóicas do Grupo Ceará; (4) Batólito Neoproterozóico calco-alcálico de Santa Quitéria; (5) Granitóides Brasileiros; (6) Cobertura Fanerozóicas (e.g. Amaral *et al.*, 2012; Araújo *et al.*, 2012).

II.4.1 Núcleo Arcaico (NA)

O Núcleo Arcaico, com uma área de exposição de cerca de 6000 km², ocupa a porção sudeste do DCC, sendo limitado, a norte e a oeste, pelo complexo gnáissico paleoproterozóico e, a sudeste, pelo Lineamento Senador Pompeu (Fig. II.8; Brito Neves, 1975; Fetter, 1999). O Núcleo Arcaico foi definido inicialmente como um domínio composto por duas unidades principais, Mombaça e Pedra Branca, constituídas por dois conjuntos litológicos com evoluções distintas:

- gnaisses biotíticos de tonalidade cinza, metamorfizados na fácies granulítica e derivados de protólitos plutônicos de afinidade tonalítica / trondjemítica / granodiorítica (TTG);
- associação vulcano-sedimentar do tipo “*greenstone-gneiss*”.

Fetter (1999) interpretou os gnaisses TTG, com idades de cristalização 2,7-2,8 Ga (U-Pb em zircão) e valores negativos de ϵ_{Nd} , como terrenos de arco magmático continental resultantes da reciclagem de rochas crustais mais antigas. Por outro lado, o mesmo autor considerou que a associação vulcano-sedimentar do tipo “*greenstone-gneiss*”, com idades U-Pb semelhantes mas valores positivos de ϵ_{Nd} , poderia representar um segmento de crosta juvenil gerada num domínio oceânico isolado.

Trabalhos posteriores demonstraram que, para além das unidades Mombaça e Pedra Branca, alguns dos terrenos que afloram a noroeste do bloco de Pedra Branca, correspondem a uma sequência TTG contendo zircões herdados de um soco mais antigo. Com efeito, Silva *et al.* (2002) obtiveram uma idade SHRIMP de 3270 ± 5 Ma em zircões de um gnaiss tonalítico do Bloco Tróia-Pedra Branca, a sudoeste de Boa Viagem.

Por este motivo, no novo Mapa Geológico do Ceará, na escala 1:500.000, esta sequência foi incluída, em conjunto com as unidades Mombaça e Pedra Branca, numa unidade mais ampla, conhecida como Complexo Cruzeta (Cavalcante *et al.*, 2003).

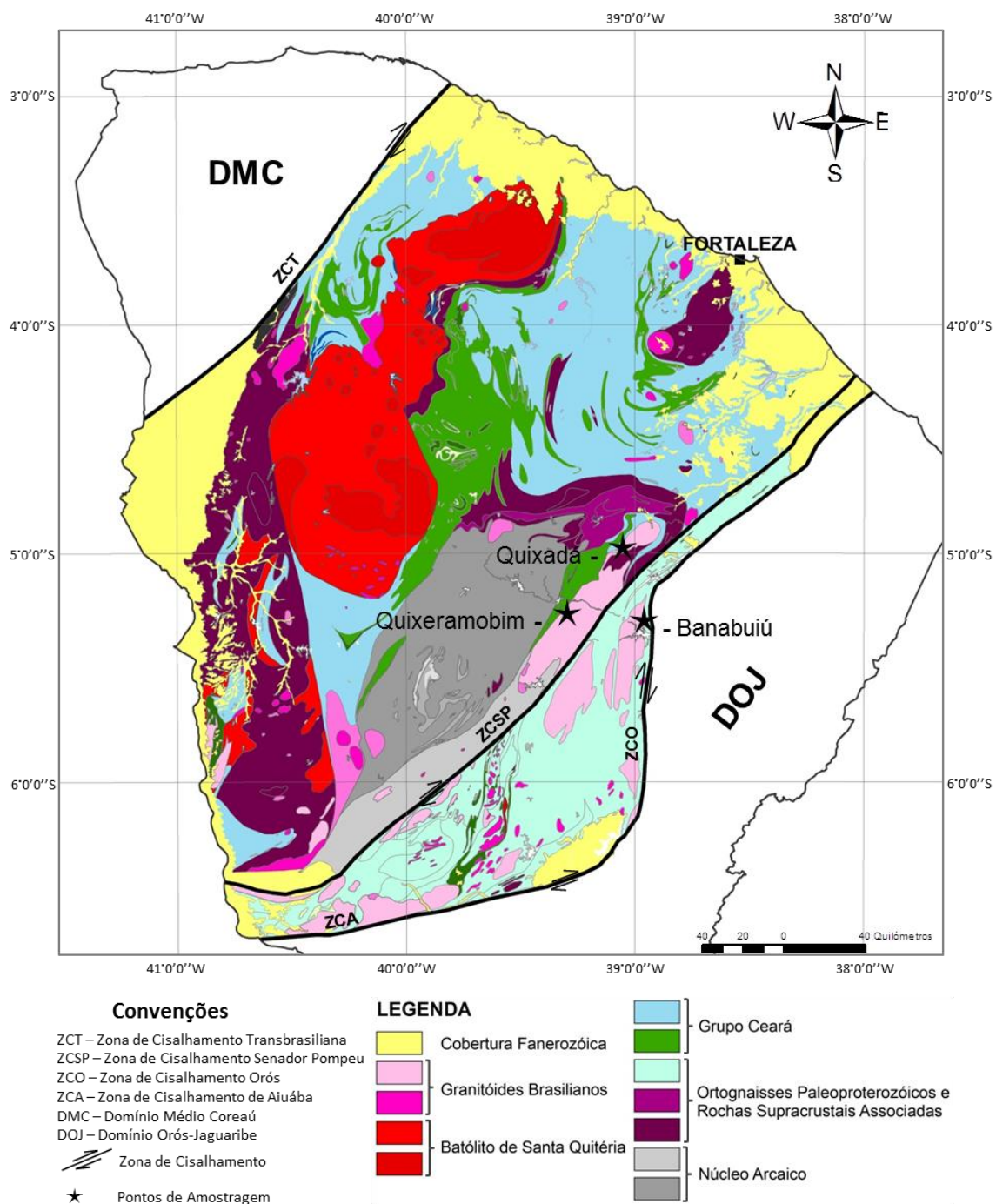


Figura II.8 – Mapa geológico do Domínio Ceará Central, representando os locais de recolha de amostras (estrelas), adaptado do Mapa Geológico do Ceará de Cavalcante et al. (2003).

II.4.2 Ortognaisses Paleoproterozóicos e rochas supracrustais associadas

Os terrenos gnáissico-migmatíticos do DCC incluem várias unidades entre as quais se destacam as seguintes:

- Ortognaisses Paleoproterozóicos. Neste grupo incluem-se os ortognaisses de Madalena - Choró, com composição diorítica a tonalítica e idades compreendidas entre

2,1–2,2 Ga (Fetter *et al.*, 1999; Martins, 2000), bem como os ortognaisses tonalíticos – granodioríticos que constituem o soco das sequências supracrustais neoproterozóicas de Canindé (Fig. II.8). Esta última associação de rochas metaplutônicas forneceu idades U-Pb compreendidas entre 2,11 e 2,19 Ga (Fetter, 1999; Castro, 2004) e apresenta frequentemente sinais de migmatização (Cavalcante *et al.*, 2003).

- Rochas supracrustais. Em estreita associação com os ortognaisses de Madalena – Choró, ocorre uma faixa metamórfica de rochas supracrustais (Algodões), constituída por metavulcanitos básicos (anfibolitos com e sem granada) e metassedimentos de natureza variada, nos quais se intercalam formações ferríferas manganésíferas bandadas (Fig. II.8, Arthaud & Landim, 1995; Martins, 2000). Martins & Oliveira (2004) obtiveram uma isócrona Sm-Nd em rocha total de ca. 2,23 Ga para os anfibolitos da sequência Algodões. Por outro lado, aos ortognaisses tonalíticos – granodioríticos de Canindé associa-se uma sequência paraderivada, composta por gnaisses biotíticos, gnaisses com biotite e granada e gnaisses com biotite, granada e sillimanite, que contêm zircões detríticos com picos de idades variando entre 1,8 e 2,2 Ga (Fig. II.8, Amaral *et al.*, 2010).

- Complexo gnaissico-migmatítico de Acopiara. Este complexo localiza-se na região central do Estado do Ceará, estando limitado a oeste pela zona de cisalhamento Senador Pompeu e a este pela zona de cisalhamento Orós (Fig. II.8). Segundo Cavalcante *et al.* (2003), o complexo de Acopiara é constituído essencialmente por metatexitos contendo leucossomas de composição tonalítica, granodiorítica e granítica, nos quais pode ocorrer granada. Os paleossomas variam de micaxistos biotíticos a anfibolitos. Embora Brito Neves (1975), *in* Torquato *et al.* (1989) tenham apresentado uma idade Rb-Sr de 2020 ± 130 Ma para estas rochas, com base na qual consideram que o Complexo Acopiara é mais antigo que o Grupo Ceará, ainda persistem dúvidas sobre a sua possível correlação com o Grupo Ceará.

II.4.3 Grupo Ceará

Grande parte do DCC é coberto por rochas metassedimentares de idades predominantemente neoproterozóicas, agrupadas no chamado Complexo ou Grupo Ceará (Parente *et al.*, 2008) (Fig. II.8). O Grupo Ceará é formado por uma associação litológica essencialmente metapelítica e metapsamítica, na qual se intercalam quartzitos, mármore, rochas calco-silicatadas e, embora com carácter mais subordinado, rochas metavulcânicas (Cavalcante *et al.*, 2003; Fetter *et al.*, 2003; Arthaud *et al.*, 2008).

A sequência mostra frequentemente paragénese metamórficas da facies anfibolítica de grau alto e deformação intensa relacionada com uma tectónica de baixo ângulo, que só é verticalizada nas proximidades das zonas de cisalhamento dúctil que recortam o DCC. Os dados geocronológicos disponíveis revelam que os eventos tectono-metamórficos que afectaram esta unidade estão relacionados unicamente com o ciclo orogénico Brasileiro e que o pico metamórfico terá sido atingido aos 621 ± 160 Ma (isócrona Sm-Nd em rocha total e granada obtida numa amostra dos paragneisses da região de Itatira, Santos *et al.*, 2003).

A idade de deposição do Complexo Ceará não é conhecida com exactidão. No entanto, as datações U-Pb obtidas em zircões de metabasitos e de metariolitos intercalados nesta formação (ca. 750 Ma e 772 ± 31 Ma, respectivamente) sugerem que a sedimentação se poderá ter iniciado por volta dos 770 Ma, a partir da fragmentação e rifting do soco Arcaico / Paleoproterozóico (Fetter, 1999; Arthaud *et al.*, 2008; Amaral *et al.*, 2010).

Deve salientar-se ainda que os materiais sedimentares que constituem o Grupo Ceará parecem ser essencialmente provenientes da erosão do soco paleoproterozóico. Com efeito, as idades modelo (T_{DM}) obtidas em rochas da Sequência Itatira (2,25 Ga, Santos *et al.*, 2003) e as idades U-Pb de zircões detríticos (2,2 - 1,8 Ga, Amaral *et al.*, 2010) apontam para uma importante contribuição do continente paleoproterozóico para a génese destes depósitos. Apesar de menos pronunciado, o envolvimento de fontes mais antigas, com idades mesoproterozóicas, é também referido por vários autores (Fetter, 1999; Santos *et al.*, 2003; Torres, 2004; Castro *et al.*, 2003). Em rochas calco-silicatadas da região de Redenção, Torres (2004) obteve ainda uma idade T_{DM} de 949 Ma.

II.4.4 Batólito de Santa Quitéria

O batólito Tamboril-Santa Quitéria corresponde a um complexo ígneo / anatético composto por um grande volume de magmas tonalíticos a graníticos intruídos em diatexitos e metatexitos, que incluem mega-encraves de rochas calco-silicatadas e anfibolitos (Fetter *et al.*, 2003, Castro 2004, Arthaud *et al.*, 2008). Fetter *et al.* (2003) obteve idades neoproterozóicas para as rochas migmatíticas deste complexo. Por outro lado, as idades U-Pb determinadas em zircões dos granitóides do batólito Tamboril-Santa Quitéria variam entre 660 - 614 Ma (Fetter *et al.*, 2003; Brito Neves *et al.*, 2003) e 620 - 611 Ma (Castro 2004).

Segundo Fetter *et al.* (2003), o complexo batolítico Tamboril-Santa Quitéria pode representar um arco magmático continental, formado nas fases precoces da orogenia

Brasileira. A zona de sutura, com mergulho para este, estaria localizada a oeste, próximo do Lineamento Transbrasileiro. Neste cenário, as rochas granitóides testemunhariam o último episódio da evolução do arco, marcado pelo aumento progressivo da participação crustal (Fetter *et al.*, 2003). Com base nas idades Pb-Pb obtidas em zircões de gnaisses granodioríticos situados no bordo este do complexo (795 Ma), Araújo *et al.* (2010) consideram que o batólito Tamboril-Santa Quitéria se pode ter gerado num ambiente de arco magmático continental ou arco intra-oceânico, numa fase pré-colisão.

Devido à intensa deformação e metamorfismo que afectaram o encaixante, torna-se difícil reconstituir a geometria do arco magmático de Santa Quitéria (AMSQ). A caracterização de retroeclogitos e de anfibólitos com granada presentes no bordo este do AMSQ, nos arredores de Itaitia e Pentecoste, levaram alguns autores a propor que o fecho do oceano teria ocorrido no sentido NNW e, não no sentido SE (Castro 2004; Garcia & Arthaud 2004; Amaral *et al.* 2008).

II.4.5 Granitóides Brasileiros

Para além do complexo batolítico Tamboril-Santa Quitéria, possivelmente associado a um evento pré-colisional, o Domínio Ceará Central foi intruído por abundantes volumes de granitóides sin-orogénicos durante o ciclo Brasileiro. Parente *et al.* (2008) agruparam os granitóides brasileiros nas seguintes categorias:

- (1) Granitóides sin-tectónicos, instalados durante a fase de espessamento crustal e subsequente extrusão lateral. Neste grupo incluem-se os granitos de duas micas de tipo S gerados durante o pico metamórfico (batólitos de Senador Pompeu e Banabuiú);
- (2) Granitóides tardi-tectónicos, cuja intrusão terá sido controlada por megazonas de transcorrência desenvolvidas ou reactivadas após o pico metamórfico (batólitos de Quixeramobim e Quixadá);
- (3) Granitóides pós-tectónicos, relacionados com o colapso da cadeia brasileira. Estes granitóides, com idades Câmbrio-Ordovícicas (535 - 480 Ma; Fetter, 1999, Castro, 2004), estão representados pelos maciços de Mucambo, Meruoca, Serra da Barriga, Pagé, Serrote São Paulo e pelo Complexo Anelar Quintas.

II.4.6 Cobertura Fanerozoica

A partir do final do ciclo Brasileiro, a reactivação das megazonas de cisalhamento em condições frágeis deu origem à formação de pequenas bacias do tipo *pull-apart* onde

se acumularam sequências de sedimentos resultantes da erosão dos materiais do substrato.

II.5 O BATÓLITO DE QUIXERAMOBIM

Tendo em conta que o trabalho de cartografia geológica realizado no âmbito desta tese incidiu essencialmente sobre o Batólito de Quixeramobim, referir-se-ão em maior pormenor as características gerais deste complexo intrusivo e descrever-se-ão as principais unidades que o constituem. Como foi mencionado anteriormente, a instalação deste batólito foi controlada por megazonas de transcorrência desenvolvidas ou reactivadas após o pico metamórfico, pelo que se tem sido incluído este maciço no grupo dos granitóides tardi-tectónicos. O batólito ocorre como um corpo alongado na direcção NE-SW, com um comprimento que atinge os 65 km e uma largura média de 15 km. Ocupa uma área com mais de 900 km² na porção central da Folha Quixeramobim, sendo limitado, a SE, pela Zona de Cisalhamento Senador Pompeu e, a NW, pela Zona de Cisalhamento de Quixeramobim (Figs. II.8 e II.9).

Com base em critérios texturais e composicionais, foram individualizadas seis fácies distintas no interior do batólito (Torquato *et al.*, 1989; Nogueira, 2004; Parente *et al.* 2008; Almeida *et al.* 2001): Muxurê Novo, Serra Branca, Muxurê Velho, Água Doce, Uruquê e Mobilizados Tardios.

II.5.1. Fácies Muxurê Novo

As rochas da unidade Muxurê Novo constituem a litologia dominante do batólito (Fig. II.9). Apresentam coloração cinza clara, textura porfiróide e composição variando de granodiorítica a granítica. A matriz é inequigranular de grão médio a grosseiro e os fenocristais de feldspato (plagioclase e feldspato potássico), com dimensões entre 2 a 6 cm, estão geralmente alinhados, definindo uma foliação de fluxo magmático. Nos contactos com o encaixante metamórfico, estes granitóides podem exhibir sinais de deformação no estado sólido. A deformação é heterogénea e está marcada pelo desenvolvimento de “*shear bands*” (Torquato *et al.*, 1989).

No interior da mancha principal, Almeida (1995) individualizou uma faixa estreita com 500 a 700 metros de extensão que denominou Sub-Fácies Boa Fé. Mais tarde, Parente *et al.* (2008) vieram a classificá-la como mais uma unidade plutónica do batólito, contrariamente a Torquato *et al.* (1989) que a consideram como uma sub-fácies do granitóides de Muxurê Novo.

A sub-unidade Boa Fé é composta por granodioritos e monzogranitos porfiróides de grão mais fino, com tonalidades variando de cinza claro a cinza escuro, nos quais se encontram, com frequência, encraves quartzo-dioríticos. Os fenocristais (2 a 2,5 cm) são mais estreitos e estão, em geral, orientados.

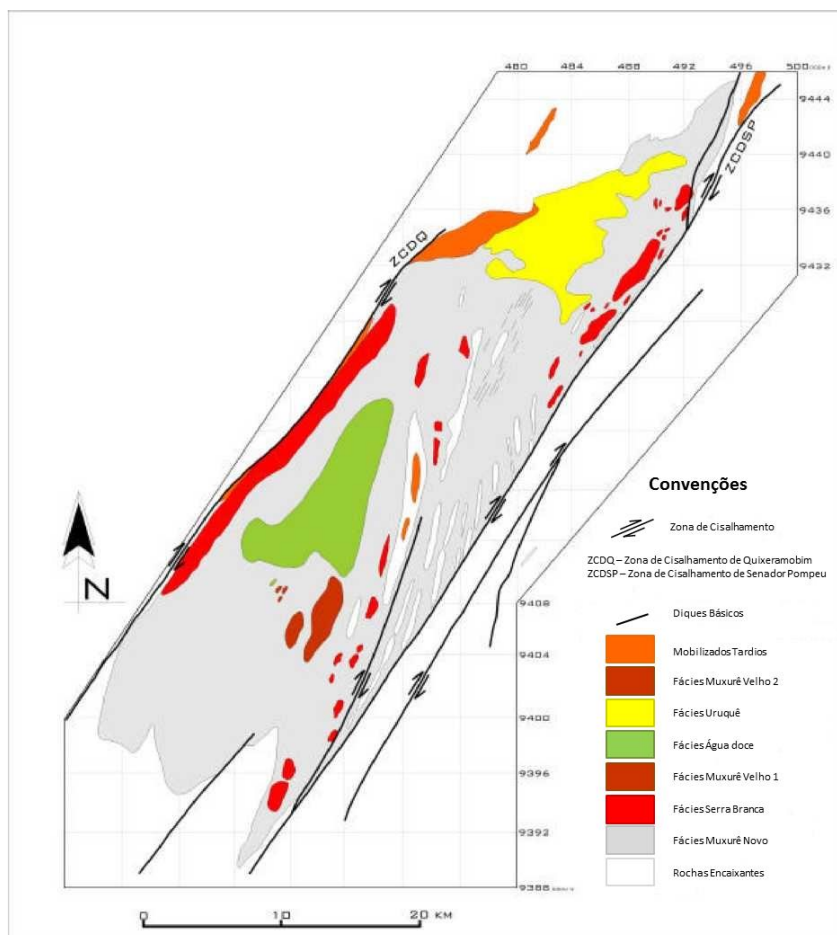


Figura II.9 – Mapa simplificado mostrando a distribuição das fácies no interior do Batólito de Quixeramobim (modificado de Torquato et al., 1989 e Almeida, 1995).

Do ponto de vista mineralógico, os granitóides de Muxurê Novo são formados por quartzo, plagioclase, feldspato potássico e biotite em proporções variáveis. A anfíbola está presente pontualmente. A apatite, o zircão e os minerais opacos constituem as fases acessórias mais comuns. No seu conjunto, os granitóides desta unidade têm sido caracterizados geoquimicamente como fazendo parte de uma série calco-alcalina de médio potássio (Torquato et al., 1989, Almeida, 1995).

II.5.2. Fácies Serra Branca

Os granitóides da unidade Serra Branca ocorrem nas margens este e oeste do batólito, formando faixas alongadas com 3 a 20 km de comprimento (Fig. II.9). Podem constituir também diques intrusivos nos granitóides de Muxurê Novo e de Água Doce (Torquato *et al.*, 1989, Almeida *et al.*, 2001).

Em termos litológicos, predominam os monzogranitos com biotite e anfíbola. Estas rochas apresentam coloração cinza clara, textura porfiróide bem marcada, matriz de granularidade média e uma foliação de fluxo magmático, conferida pelo alinhamento de megacristais de feldspato, com direcção N40°E e mergulho acentuado. Contêm abundantes encraves microgranulares de composição tonalítica. Embora menos abundantes, a fácies Serra Branca inclui ainda quartzo-monzodioritos e sienogranitos. Tal como no caso da unidade Muxurê Novo, estas rochas integram-se numa série calco-alcalina de médio potássio (Torquato *et al.*, 1989, Almeida, 1995).

II.5.3 Fácies Muxurê Velho

As rochas granitóides de Muxurê Velho afloram apenas no sector sudoeste do batólito (Fig. II.9) e foram agrupadas em duas sub-unidades: Muxurê Velho I e Muxurê Velho II (Torquato *et al.*, 1989). As duas sub-unidades são compostas por dioritos, quartzo-dioritos, tonalitos e granodioritos, mas distinguem-se entre si pelo predomínio de anfíbola sobre a biotite nos granitóides de Muxurê Velho I e pela dominância de biotite nos de Muxurê Velho II. De uma forma geral, estas rochas apresentam coloração cinza-escuro, granularidade fina e textura porfiróide.

II.5.4 Fácies Água Doce

Segundo Torquato *et al.* (1989), a unidade Água Doce é composta por uma associação de quartzo-dioritos, quartzo-monzodioritos, tonalitos e granodioritos, que ocorrem na porção central do batólito, definindo contactos gradativos com os granitóides de Muxurê Novo (Fig. II.9). Estes litótipos variam de leuco a mesocráticos e possuem texturas predominantemente granulares. Contudo, podem encontrar-se também variedades porfiróides de grão médio a fino, com fenocristais euédricos a subédricos, cuja dimensão máxima não ultrapassa 2 cm. Os granitóides desta unidade contêm frequentemente “clots” biotíticos distribuídos homogeneamente. Em conjunto, os diferentes termos da unidade Água Doce definem uma sequência calco-alcalina com baixo teor em potássio (Torquato *et al.*, 1989).

II.5.5 Fácies Uruquê

As rochas da unidade Uruquê ocorrem em diques e soleiras, definindo relações intrusivas com todas as outras fácies, exceptuando com as de Muxurê Velho (Fig. II.9). No entanto, os contactos entre os granitóides de Uruquê e os de Muxurê Novo são, por vezes, gradativos, o que levou Almeida *et al.* (2001) a individualizar a sub-unidade Uruquê - Transicional Muxurê Novo.

A maioria dos litótipos que integram a unidade Uruquê apresenta cor cinza-clara, grão médio a fino (0,2 cm) e textura geralmente inequigranular (Torquato *et al.*, 1989), tendo sido incluídas numa série calco-alcalina de alto potássio (Almeida, 1995).

Os granitóides da sub-unidade Uruquê - Transicional Muxurê Novo, de coloração cinza-clara e textura porfiróide, possuem fenocristais de microclina e plagioclase (Pl >Kf) numa matriz de granularidade fina composta por plagioclase, biotite, microclina e quartzo.

II.5.6 Mobilizados tardios

No conjunto “mobilizados tardios”, incluem-se os filões pegmatíticos, aplíticos e micrograníticos, que ocorrem preferencialmente nas margens do batólito, cortando os granitóides de todas as outras unidades (Fig. II.9).

CAPÍTULO III:
CARTOGRAFIA GEOLÓGICA E PETROGRAFIA

CAPÍTULO III: CARTOGRAFIA E PETROGRAFIA

Este capítulo inicia-se com a descrição das principais características de campo das rochas que afloram na área de Quixeramobim, acompanhada pela apresentação do mapa geológico na escala 1:25.000 elaborado durante a presente investigação. O mapa foi produzido em ambiente ArcGIS (*ArcGIS 9.3 - ESRITM*) e inclui a indicação dos pontos de observação. Em seguida, mostram-se os resultados do estudo petrográfico efectuado em 8 amostras representativas de algumas das unidades cartografadas.

A região cartografada neste trabalho, com uma área de cerca de 55 km², é composta por duas unidades principais: o Grupo Ceará (GC) e o Batólito de Quixeramobim (Fig. III.1). O Grupo Ceará é constituído por rochas supracrustais neoproterozóicas agrupadas em duas formações (Quixeramobim e Juatama), enquanto o Batólito de Quixeramobim corresponde a um complexo plutónico de idade Brasileira, no qual foram individualizados diferentes litótipos de granitóides (fácies). O contacto entre o Grupo Ceará (GC) e o Batólito de Quixeramobim é marcado pela Zona de Cisalhamento dextra de Quixeramobim (ZCQ), com orientação NE-SW (Fig. III.1).

III.1 TRABALHO DE CAMPO

Na área estudada, o Grupo Ceará está representado pelas Unidades Quixeramobim e Juatama que afloram a NW da ZCQ (Fig. III.1). As rochas de ambas as unidades apresentam, em geral, uma foliação bem definida, com orientação NE-SW e mergulho para NW, o qual se acentua nas proximidades da ZCQ. De NW para SE, observa-se um aumento da intensidade da deformação e do grau metamórfico.

III.1.1 Grupo Ceará: Unidade Quixeramobim – Ppcqu

A Unidade Quixeramobim aflora na porção noroeste da região. Contacta a sudeste com a unidade de Juatama e prolonga-se para nordeste até ao batólito de Quixadá, localizado fora da área. No interior da Unidade Quixeramobim foi individualizada uma formação quartzítica que, devido à sua expressão cartográfica, foi marcada separadamente no mapa apresentado (Fig. III.1).

Litologicamente, a Unidade Quixeramobim é formada por um conjunto de rochas metassedimentares pelíticas, contendo intercalações de quartzitos, rochas calcosilicatadas, mármore e anfibolitos. A sequência foi afectada por metamorfismo regional que deverá ter atingido o topo da fácies anfibolítica. Com efeito, as litologias pelíticas estão representadas essencialmente por gnaisses paraderivados, por vezes, migmatizados, nos quais se podem intercalar, micaxistos.

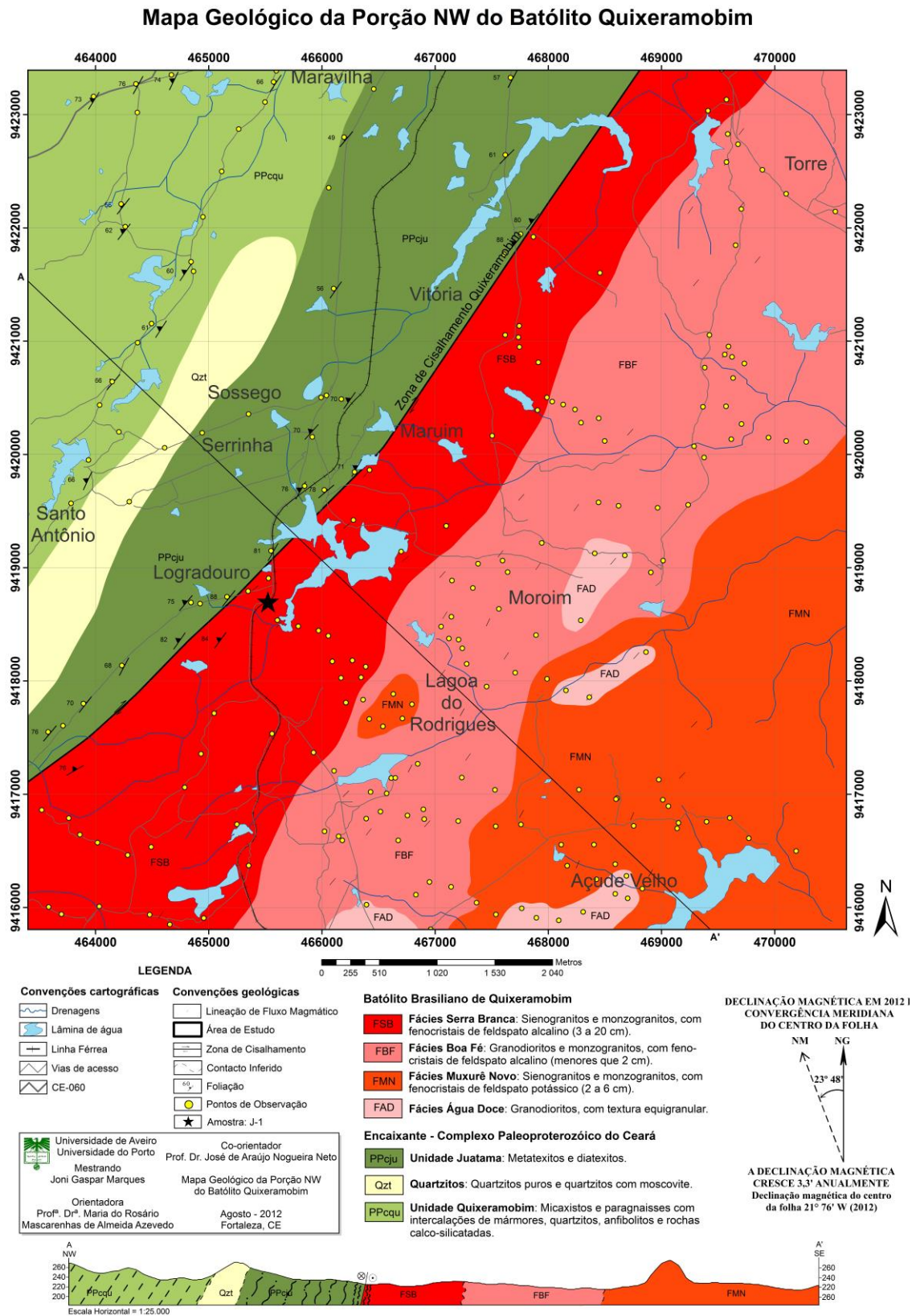


Figura III.1 - Mapa Geológico da Porção NW do Batólito Quixeramobim.

Os paragneisses desta unidade apresentam um fino bandado gnáissico, definido pela alternância de leitos ricos em biotite (máficos) e bandas quartzo-feldspáticas (félsicas) de espessura milimétrica a centimétrica (Estampa III.1 – Fot. III.1). A foliação gnáissica tem orientação NE-SW e pendores variando entre 45° e 60° para NW. Na maioria dos casos, as bandas félsicas parecem resultar de processos de fusão parcial (migmatização), embora não possa excluir-se a hipótese de alguns dos níveis quartzo-feldspáticos terem sido produzidos por segregação metamórfica (Estampa III.1 – Fot. III.2). Para além de quartzo e feldspato, estas rochas podem conter pequenas quantidades de micas (moscovite > biotite), havendo casos em que se identificaram cristais milimétricos de granada (Estampa III.1 – Fot. III.3). Os leitos máficos são constituídos essencialmente por biotite, com proporções variáveis de moscovite, silimanite, distena e granada (Parente *et al.*, 2008). Em estreita associação espacial com os paragneisses aparecem, por vezes, níveis lenticulares de anfibolitos e formações ferríferas bandadas.

Intercalados nos paragneisses, ocorrem frequentemente micaxistos mostrando uma xistosidade muito penetrativa, concordante com a foliação gnáissica (Estampa III.2 – Fot. III.4). A xistosidade é conferida pelo alinhamento preferencial dos filossilicatos (biotite e moscovite) que são extremamente abundantes nestas litologias (> 50%). Nalguns afloramentos, a xistosidade está crenulada sugerindo que estas rochas foram afectadas por mais do que um episódio de deformação.

As rochas calco-silicatadas constituem, em geral, corpos lenticulares descontínuos. Apresentam cor cinza escura a esverdeada e uma anisotropia pouco marcada definida pela alternância de níveis ricos em granada, piroxena e anfíbola e leitos félsicos compostos por quartzo e plagioclase. Estes litótipos contêm frequentemente porfiroblastos de granada e/ou anfíbola.

Pontualmente, observaram-se ainda corpos lenticulares de mármore calcíticos, calcíticos dolomíticos e/ou dolomíticos, com uma espessura máxima de 15 m, que se podem repetir no espaço, originando faixas com cerca de 30 m de largura. Estes litótipos estão normamente relacionados com filões pegmatíticos (Estampa III.2 – Fot. III.5).

Na área em estudo, os quartzitos dão origem a relevos de dureza (altos topográficos) e estão particularmente bem representados numa faixa, alinhada segundo o *trend* regional, localizada no limite entre as unidades Quixeramobim e Juatama (Fig. III.1). As suas composições variam de quartzitos puros a ferruginosos e/ou micáceos e possuem, em geral, granulação fina a média, coloração esbranquiçada, amarelada ou avermelhada e uma estrutura maciça.

ESTAMPA III.1 – Grupo Ceará: Unidade Quixeramobim



Fot. III.1: Afloramento de paragnaisse migmatizado (MJM-153). Coordenadas UTM: 464263mE/9422010mN.



Fot. III.2: Leucossomas em paragnaisse migmatizado (RGD-54). Coordenadas UTM: 463937mE/9419950mN.



Fot. III.3: Granada em leucossoma de paragnaisse migmatizado (MJM-156). Coordenadas UTM: 464357mE/9423270mN.

ESTAMPA III.2 – Grupo Ceará: Unidade Quixeramobim



Fot. III.4: Micaxistos intercalados em paragneisse (MJM-156). Coordenadas UTM: 464357mE/9423270mN.



Fot. III.5: Corpo lenticular de mármore associado a pegmatito (MJM-152). Coordenadas UTM: 464844mE/9421700mN.



Fot. III.6: Blocos de quartzito rolado da Unidade Quixeramobim (MJM-149). Coordenadas UTM: 464372mE/9420986mN.

Na maioria dos afloramentos, os quartzitos ocorrem sob a forma de blocos rolados (Estampa III.2 – Fot. III.6). Toda a sequência metassedimentar da Unidade Quixeramobim é atravessada por numerosos filões pegmatíticos tardios.

III.1.2 Grupo Ceará: Unidade Juatama - Ppcju

A unidade Juatama corresponde a um cinturão de rochas migmatíticas (metatexitos e diatexitos) que aflora ao longo de uma mancha com orientação NE-SW, limitada, a sudeste, pela ZCQ e pelo Batólito de Quixeramobim (fácies Serra Branca) e, a noroeste, pela unidade Quixeramobim (Fig. III.1).

As rochas desta unidade distinguem-se das da unidade Quixeramobim por apresentarem evidências de migmatização mais intensa, o que aponta para um aumento do grau metamórfico de NW para SE. Os litótipos dominantes são metatexitos estromáticos, contendo bandas félsicas centimétricas (leucossomas) intercaladas em bandas máficas de espessura sensivelmente semelhante (Estampa III.3 – Fot. III.7 e III.8). O bandado migmatítico tem uma direcção média de N35° e pendores variáveis (46° - 88° NW), que se acentuam com a aproximação à ZCQ. Nas proximidades da ZCQ, estes litótipos mostram frequentemente sinais de milonitização (Estampa III.3 – Fot. III.7). Nos leucossomas, o quartzo e o feldspato são os constituintes principais, enquanto nos leitos escuros predominam a biotite e a moscovite. Apesar de menos abundantes, foram identificados alguns diatexitos, com aspecto ígneo e estruturas flebíticas e “schlieren” (Estampa III.3 – Fot. III.9), resultantes da cristalização de maiores quantidades de fundido.

Segundo Parente *et al.* (2008), os paragnaisses da Unidade Quixeramobim e os migmatitos da Unidade Juatama derivaram do mesmo tipo de protólitos, diferindo entre si pela presença de maiores proporções de fundido nas litologias da sequência de Juatama.

Tal como na Unidade Quixeramobim, às rochas do complexo gnáissico-migmatítico de Juatama associam-se, frequentemente, anfibolitos que ocorrem em lentículas com formato elipsoidal e dimensões máximas de 2 m, definindo contactos bruscos com os gnaisses encaixantes.

III.1.3 Batólito Quixeramobim

O batólito de Quixeramobim localiza-se na parte de sudeste da área cartografada (Fig. III.1). Apresenta uma grande diversidade de rochas magmáticas que foram agrupadas em sete fácies (Muxurê Novo, Boa Fé, Serra Branca, Muxurê Velho, Água Doce, Uruquê e mobilizados tardios) (ver Capítulo II).

ESTAMPA III.3 – Grupo Ceará: Unidade Juatama



Fot. III.7: Metatexito estromático milonitizado (RGD-60). Coordenadas UTM: 466172mE/9420488mN.



Fot. III.8: Pormenor de um metatexito estromático mostrando a alternância de leucossomas e bandas escuras (RGD-63). Coordenadas UTM: 466458mE/9423226mN.



Fot. III.9: Diatexito (RGD-55). Coordenadas UTM: 469616mE/9420134mN.

Na área estudada, nem todas as fácies têm expressão cartográfica. As fácies Muxurê Novo, Boa Fé e Serra Branca formam três manchas alongadas segundo o *trend* regional, enquanto as fácies Muxurê Velho e Água Doce constituem corpos mais pequenos incluídos nas manchas principais e as fácies Uruquê e os mobilizados tardios aparecem em diques intrusivos nas outras fácies (Fig. III.1). Com base nas relações observadas no campo, propõe-se uma cronologia relativa para os sucessivos episódios plutónicos envolvidos na formação do batólito, que não é totalmente concordante com a sequência de instalação definida por outros autores (Sidrim *et al.* 1988, Torquato *et al.* 1989 e Almeida 1995). A maioria dos maciços contém encraves do encaixante metamórfico.

III.1.3.1 Fácies Muxurê Velho

A fácies Muxurê Velho parece documentar um dos primeiros pulsos de actividade magmática associados à formação do batólito de Quixeramobim. Estas rochas ocorrem apenas sob a forma de encraves microgranulares, elipsoidais ou ovalados, no interior das restantes unidades, com as quais definem contactos bruscos, lobados ou transicionais (Estampa III.4 – Fot. III.10 e III.11). Os encraves têm dimensões centimétricas e estão, por vezes, fortemente estirados. Podem possuir uma foliação de fluxo magmático concordante com a da rocha hospedeira. As suas relações com os granitóides que os incluem sugerem uma contribuição importante de processos de mistura de magmas (*mixing / mingling*) na petrogénese do batólito.

As rochas desta fácies apresentam composições dioríticas a tonalíticas, coloração escura devido aos seus elevados conteúdos em biotite e anfíbola (cerca de 40%) e granularidade fina a média. Contêm, em geral, megacristais de feldspato potássico, com características e dimensões semelhantes aos das rochas hospedeiras (até 6 cm), o que, mais uma vez, aponta para a participação de mecanismos de mistura, de tipo *mingling*, entre os magmas máficos dos encraves e os líquidos mais félsicos envolventes. Nesta perspectiva, os fenocristais de feldspato potássico das rochas hospedeiras teriam sido incorporados mecanicamente na fácies Muxurê Velho e corresponderiam, por isso, a xenocristais (Estampa III.4 – Fot. III.12).

III.1.3.2 Fácies Água Doce - FAD

Tal como a fácies Muxurê Velho, as rochas da unidade Água Doce constituem corpos globulares, de dimensões métricas a quilométricas, incluídos nas fácies Boa Fé e Muxurê Novo (Fig. III.1). Correspondem a granodioritos de grão médio a fino,

mesocráticos, não porfiróides, contendo biotite \pm anfíbola como fases máficas principais (Estampa III.5 – Fot. III.13). Os seus contactos com as rochas envolvidas (Boa Fé e Muxurê Novo) são, em geral, gradativos, o que aponta para uma intrusão praticamente contemporânea das três unidades, embora com alguma anterioridade para a fácies Água Doce.

III.1.3.3 Fácies Muxurê Novo - FMN

A fácies Muxurê Novo ocupa uma extensa mancha na porção sudeste da área de estudo (Fig. III.1) e está representada por granodioritos e granitos porfiróides de grão médio a grosseiro, com tonalidade cinza (Estampa III.5 – Fot. III.14). Os fenocristais de feldspato, com dimensões variando de 2 a 6 cm, podem definir uma foliação de fluxo magmático com orientação N35°, embora também se tenham encontrado afloramentos em que não é visível uma orientação preferencial. O maciço mostra sinais de fracturação tardia (fracturas abertas e fechadas), havendo casos em que as fracturas estão preenchidas por material quartzo-feldspático (pegmatitos).

Como foi referido anteriormente, no interior da mancha principal ocorrem mega-enclaves da fácies Água Doce e enclaves microgranulares da fácies Muxurê Velho, o que parece evidenciar uma instalação ligeiramente mais tardia para a unidade Muxurê Novo. Por outro lado, estes granitóides são cortados por diques félsicos da fácies Uruquê.

III.1.3.4 Fácies Boa Fé - FBF

A fácies Boa Fé foi individualizada pela primeira vez por Almeida (1995), que a considerou inicialmente como uma sub-fácies dos granitóides de Muxurê Novo, tendo vindo a classificá-la, mais tarde, como uma nova unidade plutónica do batólito (Parente *et al.*, 2008). Na área estudada, os afloramentos desta fácies constituem uma longa faixa com orientação NE-SW limitada, a noroeste, pela fácies Serra Branca e, a sudeste, pela fácies Muxurê Novo, através de contactos transicionais (Fig. III.1).

A unidade Boa Fé é formada por granodioritos e monzogranitos porfiróides, de grão médio, com tonalidades variando de cinza escuro a cinza claro. Os fenocristais de feldspato, com dimensões em torno de 2 cm, têm hábito alongado, formas regulares e estão, em geral, bem orientados (Estampa III.5 – Fot. III.15). Apresenta enclaves microgranulares máficos da fácies Muxurê Velho e é cortada por veios pegmatíticos com várias orientações que se instalaram em fracturas abertas. As fracturas fechadas possuem orientações e espaçamentos irregulares e são pouco frequentes.

ESTAMPA III.4 – Batólito Quixeramobim



Fot. III.10: Pormenor da fácies Muxurê Velho na fácies Serra Branca (RGD-05). Coordenadas UTM: 465048mE/9417714mN.



Fot. III.11: Encraves da fácies Muxurê Velho (mais escuro) na fácies Muxurê Novo (MJM-74). Coordenadas UTM: 467537mE/941538mN.



Fot. III.12: Enclave da fácies Muxurê Velho (mais escuro) com fenocristais de feldspato, na fácies Serra Branca (RGD-4). Coordenadas UTM: 465559mE/9417534mN.

ESTAMPA III.5 – Batólito Quixeramobim



Fot. III.13: Afloramento da fácies Água Doce (MJM-75). Coordenadas UTM: 467765 mE / 9415992 mN.



Fot. III.14: Afloramento da fácies Muxurê Novo (MJM-137). Coordenadas UTM: 468972mE/9423756mN.



Fot. III.15: Afloramento da fácies Boa Fé, mostrando foliação de fluxo magmático (RGD-20). Coordenadas UTM:468289mE/9420280mN.

III.1.3.5 Fácies Serra Branca - FSB

A fácies Serra Branca constitui um maciço alongado com orientação NE-SW na porção central da área de estudo. A sudeste, define contactos gradativos com a fácies Boa Fé enquanto, a noroeste, mostra relações claramente intrusivas com os migmatitos da Unidade Juatama.

Em termos litológicos, esta unidade é composta por monzogranitos com biotite e anfíbola. Apresenta coloração cinza-claro a cinza-escuro, textura porfiróide bem marcada e uma matriz de granularidade grosseira. Os fenocristais de feldspato têm comprimentos máximos variando entre 6 e 20 cm, formas variadas dependendo da secção e podem conter inclusões de biotite e anfíbola dispostas concentricamente (Estampa III.6 – Fot. III.16). Quando estão orientados, definem uma foliação de fluxo magmático, com direcção N41° e mergulho acentuado. Nalguns afloramentos, observam-se zonas de acumulação de fenocristais de feldspato, cuja formação poderá estar relacionada com a expulsão do líquido intersticial por *filter pressing*, durante a intrusão forçada do plutão contra as rochas metassedimentares encaixantes (Estampa III.6 – Fot. III.17).

Os encraves microgranulares máficos da fácies Muxurê Velho são abundantes na unidade Serra Branca (Estampa III.6 – Fot. III.18). O maciço de Serra Branca é cortado por diques félsicos da fácies Uruquê (Estampa III.6 – Fot. III.18) e por filões pegmatíticos (quartzo + feldspato + micas \pm turmalina). Apresenta fracturas (abertas e fechadas), com espaçamento irregular, densidade relativamente baixa e uma direcção preferencial N32°.

III.1.3.6 Fácies Uruquê

Na área cartografada, a fácies Uruquê ocorre em diques de largura centimétrica e comprimento métrico, intrusivos nas unidades Serra Branca, Muxurê Novo e Boa Fé, representando, por isso, um dos últimos episódios magmáticos que afectaram a região (Estampa III.6 – Fot. III.18, Estampa III.7 – Fot. III.19 e III.20). Os diques estão orientados segundo o *trend* regional e seus contactos com as rochas adjacentes são, em geral, bruscos.

A maioria dos litótipos que integram esta unidade apresentam cor clara, grão médio a fino (0,2 cm), textura porfiróide ou não porfiróide e composições granodioríticas a monzograníticas. Os fenocristais de feldspato, quando presentes, raramente definem uma foliação de fluxo magmático.

III.1.3.7 Mobilizados Tardios

Sob a designação “mobilizados tardios”, incluem-se os filões pegmatíticos, aplíticos e micrograníticos. Os filões e veios pegmatíticos cortam todas as fácies do

batólito, estando particularmente bem representados nas três manchas principais (Serra Branca, Boa Fé e Muxurê Novo) (Estampa III.7 – Fot. III.20). Apresentam uma paragênese mineral composta por quartzo + feldspato + moscovite + biotite \pm turmalina. Nalguns casos, mostram uma estrutura zonada em que é possível individualizar um núcleo rico em quartzo e bordos contendo essencialmente feldspato (Estampa III.7 – Fot. III.21). Em termos estruturais, os filões e veios pegmatíticos não exibem nenhuma orientação preferencial.

Para além dos veios pegmatíticos, identificaram-se ainda veios de microgranitos, também discordantes, cuja instalação terá ocorrido tardiamente em relação às diferentes unidades que constituem o Batólito de Quixeramobim.

III.2 PETROGRAFIA

Por impedimentos de tempo, o estudo petrográfico realizado incidiu em lâminas delgadas e/ou polidas de apenas 8 amostras: 3 amostras do encaixante metamórfico (Unidade Quixeramobim, Grupo Ceará), 1 amostra da fácies Água Doce, 1 amostra da fácies Muxurê Novo, 1 amostra da fácies Boa Fé, 1 amostra da fácies Serra Branca e 1 amostra de um veio microgranítico tardio. Sintetizam-se, em seguida, as principais características petrográficas destes litótipos.

III.2.1 Encaixante metamórfico (Unidade Quixeramobim)

Paragneisses

Em termos petrográficos, os paragneisses da unidade Quixeramobim são caracterizados por uma textura gnáissica, conferida pela alternância de bandas quartzo-feldspáticas com leitos lepidoblásticos, ricos em biotite (Estampa III.8 – Fot. III.22). Apresentam uma associação mineralógica composta por: quartzo + feldspato potássico + plagioclase + biotite + moscovite \pm granada + apatite + opacos + clorite.

As bandas lepidoblásticas são constituídas essencialmente por pequenas palhetas subidiomórficas de biotite, com a clivagem (001) alinhada paralelamente à foliação. A moscovite é menos abundante e, tal como a biotite, forma cristais lamelares de hábito subédrico orientados segundo a foliação.

O quartzo pode ocorrer em cristais desenvolvidos, com dimensões máximas de cerca de 2 mm, hábito xenomórfico a subidiomórfico, extinção ondulante e subgranulação ou constituir um mosaico equigranular de pequenos grãos, evidenciando recristalização dinâmica.

ESTAMPA III.6 – Batólito Quixeramobim



Fot. III.16: Fenocrystal de feldspato com inclusões de biotite e anfíbola num afloramento da fácies Serra Branca (MJM-51). Coordenadas UTM:464285mE/9416462mN.



Fot. III.17: Acumulação de fenocristais de feldspato na fácies Serra Branca – filter pressing (MJM-48). Coordenadas UTM: 464932mE/9417356mN.



Fot. III.18: Fácies Serra Branca com enclave da fácies Muxurê Velho (mais escuro), cortado por dique da fácies Uruquê (mais claro) (MJM-48). Coordenadas UTM: 464932mE/9417356mN.

ESTAMPA III.7 – Batólito Quixeramobim



Fot. III.19: Apófises da fácies Uruquê (mais clara) na fácies Água Doce (MJM-77). Coordenadas UTM: 468092mE/9415886mN.



Fot. III.20: Fácies Serra Branca cortada por dique da fácies Uruquê (vermelho). Dique pegmatítico (amarelo) cortando ambas as fácies (MJM-48). Coordenadas UTM: 464932mE/9417356mN.



Fot. III.21: Veio pegmatítico com feldspato no bordo e quartzo no núcleo, intrusivo na fácies Água Doce (MJM-78). Coordenadas UTM: 468308mE/9415960mN.

Além de quartzo, as bandas granoblásticas félsicas contêm proporções variáveis de plagioclase e feldspato potássico, com tamanhos muito diversos (0,5 a 3 mm). Os grãos com maiores dimensões estão frequentemente contornados pela foliação, tendo-se observado, nalguns casos, sombras de pressão em volta destes cristais (Estampa III.8 – Fot. III.23). Ambos os feldspatos ocorrem ainda, conjuntamente com o quartzo, em agregados granoblásticos de pequenos grãos anédricos resultantes da recristalização dinâmica. Nos contactos entre feldspato potássico e plagioclase, identificaram-se, por vezes, intercrescimentos mirmequíticos entre plagioclase e quartzo vermiculares (Estampa III.8 – Fot. III.24).

Rochas calco-silicatadas

As rochas calco-silicatadas da unidade Quixeramobim apresentam uma textura granoblástica e têm como constituintes principais: quartzo, clinopiroxena (diópsido), anfíbola (tremolite-actinolite), quartzo, granada, plagioclase e opacos. Os cristais de diópsido são incolores, anédricos a subédricos, com extinção oblíqua, cores de polarização de 2ª ordem e figura de interferência biaxial positiva (Estampa III.9 – Fot. III.25). A anfíbola (tremolite-actinolite) ocorre em cristais de cor verde pálido, com hábito acicular radial e parece resultar, em grande parte, da retrogradação da clinopiroxena. A plagioclase constitui cristais subidiomórficos com a geminação polissintética característica e está frequentemente associada ao quartzo (Estampa III.9 – Fot. III.26). O quartzo é predominantemente xenomórfico e apresenta extinção ondulante e contactos côncavo-convexo entre si. A granada é poiquiloblástica e possui abundantes inclusões de piroxena, plagioclase e quartzo no seu interior (Estampa III.9 – Fot. III.27).

III.2.2 Batólito de Quixeramobim

Como foi referido anteriormente, nem todas as unidades constituintes do batólito de Quixeramobim foram objecto de estudo petrográfico. Descrevem-se em seguida as principais características mineralógicas e texturais das amostras para as quais se confeccionaram lâminas delgadas.

Fácies Água Doce - FAD

A amostra do granodiorito de Água Doce exhibe textura hipidiomórfica inequigranular, seriada, de grão fino a médio. É composta por quartzo, plagioclase, feldspato potássico, biotite, esfena, apatite, alanite, zircão, epídoto e minerais opacos.

O quartzo ocorre em cristais anédricos intersticiais e está frequentemente microfissurado (Estampa III.10 – Fot. III.28). A plagioclase domina sobre o feldspato potássico. Apresenta a macla polissintética da albite e zonamento óptico mal marcado (Estampa III.10 – Fot. III.28). A biotite é a fase máfica principal nesta amostra. Tem pleocroísmo forte, variando entre tons de bege e castanho, forma predominantemente subidiomórfica e pode conter inclusões de zircão. O epídoto e a esfena constituem cristais euédricos a subédricos, sugerindo que ambos os minerais são de origem primária (Estampa III.10 – Fot. III.28 e III.29). Tal como a apatite, estão tendencialmente associados à biotite. Num dos cristais de epídoto identificou-se um núcleo de alanite (Estampa III.10 – Fot. III.28).

Fácies Muxurê Novo - FMN

A amostra colhida na mancha de Muxurê Novo apresenta textura fanerítica, hipidiomórfica, porfiróide, de grão médio a grosseiro e contém quartzo, feldspato potássico, plagioclase, biotite e anfíbola como constituintes essenciais. A esfena, o epídoto e a apatite estão presentes como fases acessórias.

O quartzo ocorre na matriz desta amostra, formando cristais milimétricos, anédricos e intersticiais. O feldspato alcalino é microclina pertítica e pode constituir megacristais, tendencialmente subédricos, ou ocorrer na matriz em grãos de menores dimensões, predominantemente anédricos (Estampa III.10 – Fot. III.30). A maioria dos cristais de plagioclase são subidiomórficos e mostram a macla polissintética da albite. A biotite tem hábito subédrico, possui pleocroísmo acentuado (castanho claro - castanho escuro), enquanto os cristais de anfíbola (horneblenda) são subédricos a anédricos e apresentam pleocroísmo em tons de verde. Pontualmente, observaram-se pequenas secções basais euédricas deste último mineral (Estampa III.10 – Fot. III.31).

O epídoto tem tonalidade amarelada, relevo alto, forma anédrica a subédrica e cores de polarização de 2ª ordem. Os grãos deste mineral ocorrem geralmente isolados, mas formam, por vezes, pequenos agregados disseminados na matriz da rocha (Estampa III.10 – Fot. III.32). A esfena é abundante e está tipicamente associada à biotite. Apresenta tom castanho pálido, forma anédrica a euédrica e birrefringência alta.

Fácies Serra Branca - FSB

Petrograficamente, a amostra da Unidade Serra Branca apresenta grandes semelhanças com as rochas da unidade Muxurê Novo, distinguindo-se desta pela maior dimensão dos megacristais de feldspato potássico. Corresponde a um monzogranito porfiróide de grão grosseiro. Contém quartzo, feldspato potássico (microclina) e

plagioclase como fases essenciais, proporções apreciáveis de biotite e hornblenda e menores quantidades de esfena, epidoto, apatite, zircão e minerais opacos. Na proximidade da Zona de Cisalhamento dextra de Quixeramobim (ZCQ), estes litótipos podem mostrar uma foliação tectónica e sinais de recristalização dinâmica.

O quartzo constitui, em geral, cristais anédricos com extinção ondulante e subgranulação. O feldspato alcalino (microclina) ocorre tanto sob a forma de fenocristais de dimensões centimétricas e tendência subédrica, como em cristais mais pequenos, milimétricos, anédricos e intersticiais. A plagioclase tende a constituir cristais predominantemente subédricos, zonados, com a macla da albite e dimensões muito variadas. Os silicatos ferromagnesianos presentes são a biotite e a anfíbola (hornblenda). Ambos os minerais ocorrem em cristais tendencialmente subidiomórficos. A apatite pode formar cristais euédricos e está, nalguns casos, incluída nas fases dominantes. As características ópticas e a distribuição textural da esfena e do epidoto são idênticas às que se observaram na fácies Muxurê Novo. Nas rochas mais deformadas, os fenocristais de feldspato estão envolvidos por bordos da recristalização evidenciando recristalização dinâmica a alta temperatura. O quartzo ocorre em agregados granoblásticos e a biotite e a anfíbola estão orientadas.

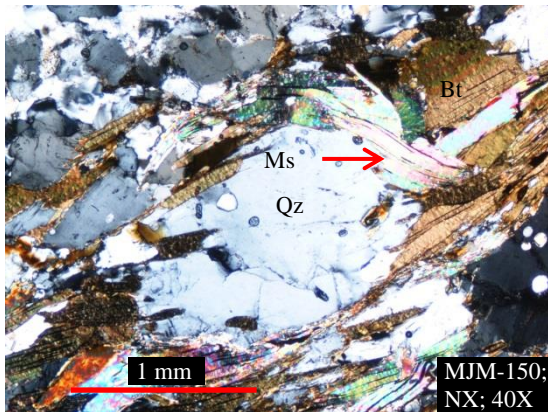
Mobilizados tardios

A única amostra de “mobilizados tardios” observada ao microscópio foi colhida num veio de microgranito. Em termos petrográficos, corresponde a um granito de grão fino a médio composto por quartzo, feldspato alcalino, plagioclase, biotite e proporções muito reduzidas de moscovite (Estampa III.10 – Fot. III.33). A esfena, a apatite e o zircão são as fases acessórias comuns nesta rocha.

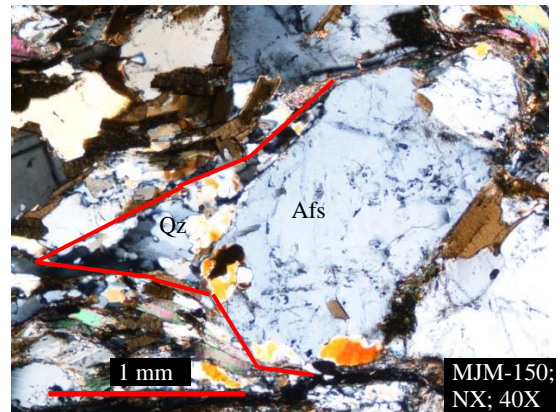
O quartzo tem hábito anédrico e mostra alguns indícios de deformação da estrutura cristalina (extinção ondulante e subgranulação). O feldspato potássico apresenta a macla axadrezada típica da microclina e está preferencialmente presente em pequenos grãos anédricos. A plagioclase ocorre em cristais subédricos com a macla polissintética da albite, com zonamento óptico mal definido.

A biotite é relativamente pouco abundante. Forma grãos de hábito subédrico a anédrico, com pleocroísmo forte entre castanho claro e castanho escuro. A moscovite ocorre em pequenos grãos subédricos dispersos na matriz da rocha. A esfena, apatite e zircão podem constituir grãos isolados ou inclusões nos minerais essenciais. Tal como nas restantes amostras estudadas, os indícios de alteração da plagioclase (moscovitização) e da biotite (cloritização) são pouco expressivos.

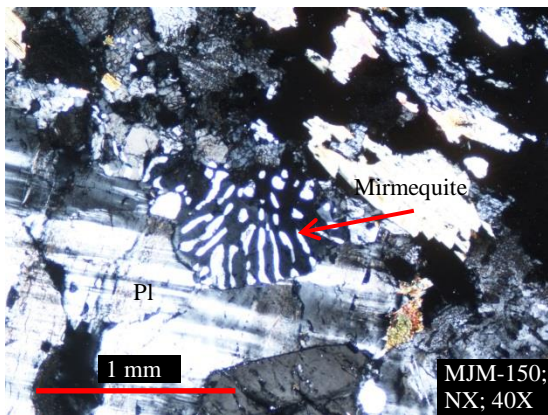
ESTAMPA III.8 – Encaixante Metamórfico (Unidade Quixeramobim)



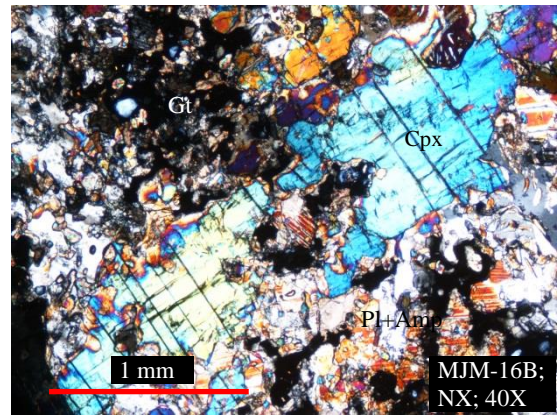
Fot. III.22 – Bandado gnáissico em paragnaisse da Unidade Quixeramobim.



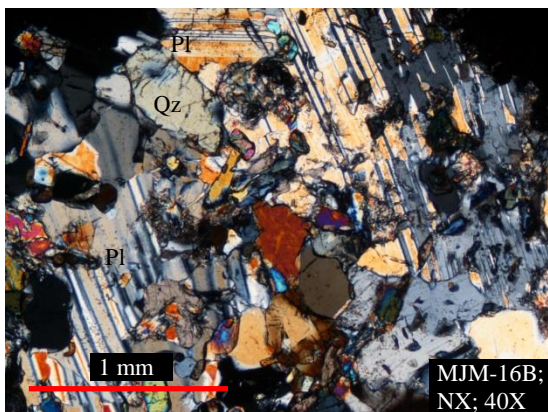
Fot. III.23 – Cristais de feldspato potássico com sombras de pressão (vermelho).



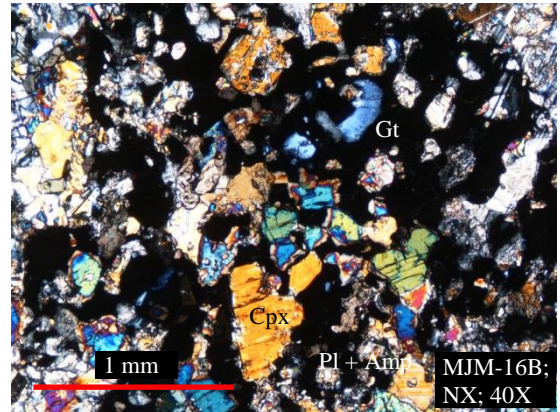
Fot. III.24 – Intercrescimentos mirmequíticos em paragnaisse da Unidade Quixeramobim.



Fot. III.25 – Secção de clinopiroxena (diópsido) em rocha calco-silicatada.

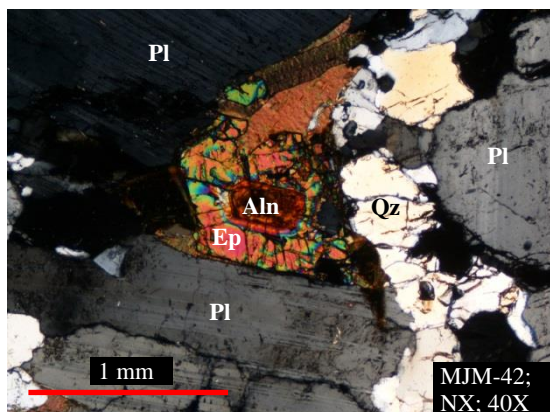


Fot. III.26 – Cristais de plagioclase e quartzo em rocha calco-silicatada.

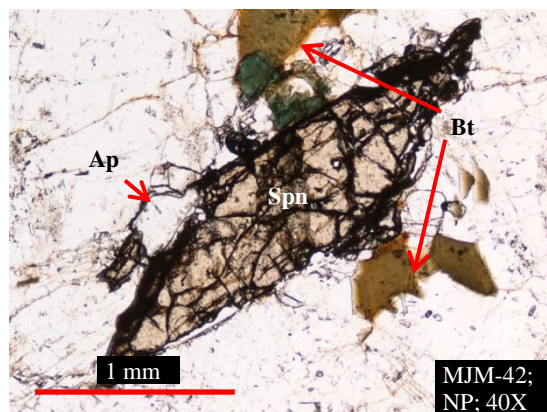


Fot. III.27 – Granada poiquiloblástica com inclusões de clinopiroxena em rocha calco-silicatada.

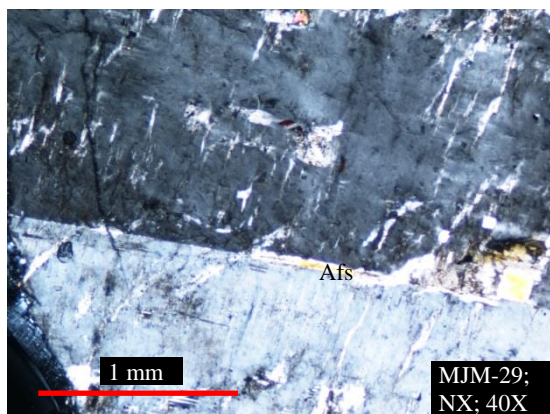
ESTAMPA III.9 – Batólito Quixeramobim



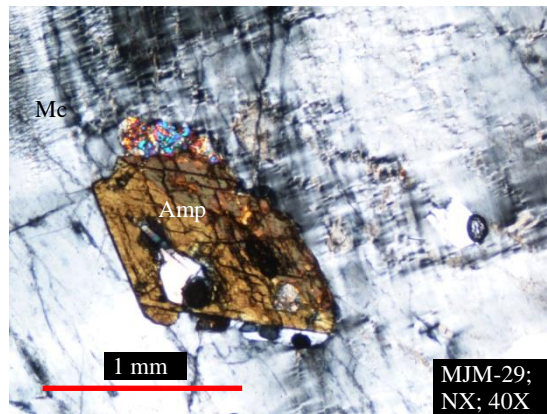
Fot. III.28 – Cristais de plagioclase, quartzo e epídoto (com um núcleo de alanite) numa amostra da fácies Água Doce.



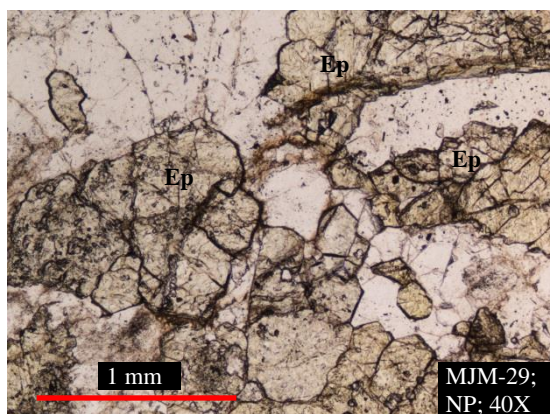
Fot. III.29 – Cristal euédrico de esfena primária, associado a biotite e apatite (fácies Água Doce).



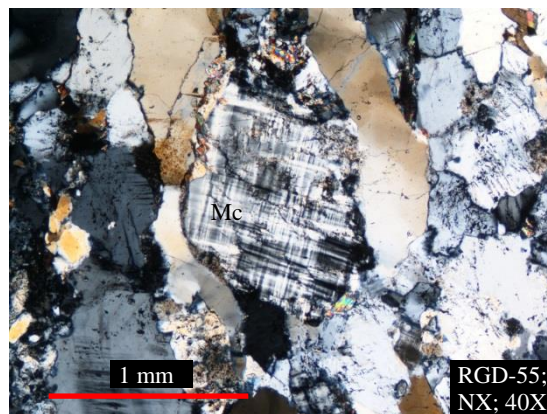
Fot. III.30 – Fenocristal de feldspato potássico pertítico com macla de Carlsbad (fácies Muxurê Novo).



Fot. III.31 – Secção basal de anfíbola em contacto com microclina (fácies Muxurê Novo).



Fot. III.32 – Agregados de grãos de epídoto na fácies Muxurê Novo.



Fot. III.33 – Aspecto geral de lâmina delgada de um granito tardio evidenciando uma microclina.

CAPÍTULO IV:

ESTUDO DA FRACTURAÇÃO

CAPÍTULO IV: ESTUDO DA FRACTURAÇÃO

Esta parte do trabalho teve como principal objectivo efectuar um estudo sumário sobre a fracturação nos afloramentos em que se colheram amostras. Nas secções seguintes, descreve-se a metodologia usada na caracterização da fracturação e apresentam-se os resultados obtidos.

As descontinuidades presentes nas rochas determinam, em grande parte, as propriedades mecânicas do maciço rochoso, a estabilidade dos taludes naturais e de escavação e o tamanho e a forma dos blocos a extrair. Por isso, o estudo das descontinuidades constitui um aspecto importante na caracterização geomecânica dos maciços rochosos e na exploração da rocha natural.

Segundo a *International Society for Rock Mechanics* (ISRM), “descontinuidade” é o termo dado a qualquer descontinuidade mecânica, num maciço rochoso, que tem baixa ou nenhuma resistência à tracção. Assim, falhas, diaclases, superfícies de estratificação/xistosidade ou contactos litológicos constituem diferentes tipos de descontinuidades. No caso dos granitóides, as descontinuidades mais comuns são as diaclases.

As diaclases são superfícies de fractura sem movimentação associada. De acordo com Marre (1982), as diaclases que se desenvolvem em rochas plutónicas podem ser subdivididas em duas categorias: primárias e secundárias. As diaclases primárias estão ligadas aos processos de intrusão magmática e apresentam relações geométricas particulares com as estruturas fluidais. Por outro lado, as diaclases secundárias formam-se após a instalação do corpo ígneo.

IV.1 TRABALHO DE CAMPO

O estudo da fracturação foi realizado nos mesmos locais onde foram recolhidas amostras para os ensaios de caracterização tecnológica e radiométrica: uma pedreira próxima de Banabuiú (Estação 1; Fig. IV.1), um afloramento junto à entrada de Quixadá (Estação 2; Fig. IV.2) e um conjunto de afloramentos da unidade Serra Branca (Estação 3). As coordenadas destes locais encontram-se na Tabela IV.1.

Tabela IV.1 – Coordenadas UTM WGS 84 dos locais de estudo.

Local		m Este	m Norte
Banabuiú (Estação 1 – E1)		502721	9416666
Quixadá (Estação 2 – E2)		501479	9451762
Serra Branca (Estação 3 – E3)	Vértice Superior Esquerdo	463398	9423397
	Vértice Superior Direito	470639	9423397
	Vértice Inferior Esquerdo	463398	9415800
	Vértice Inferior Direito	470639	9415800



Figura IV.1 – Pedreira de Banabuiú (Estação 1).



Figura IV.2 – Afloramento junto a uma bomba de combustível, Quixadá (Estação 2).

IV.2 DESCRIÇÃO DOS AFLORAMENTOS

A pedreira de Banabuiú (Estação 1) é uma das pequenas pedreiras da região onde se explora granito para o comércio nacional e internacional de rochas ornamentais e de revestimento (ver capítulo II, Fig. II.8). Também é usado em agregados e pavimentos para a construção civil. Este granito tem várias denominações comerciais consoante a pedreira de extracção, “Branco Banabuiú” e “Branco Astro”, apesar das semelhanças petrográficas entre os diferentes litótipos.

O acesso a esta pedreira é livre, não tendo qualquer tipo de vedação nem guardas. A lavra é feita por blocos, a uma cota de cerca de 200 m. Inicialmente, a

extracção realizava-se no local escolhido, neste trabalho, para efectuar o estudo da fracturação (Estação 1). Devido à ocorrência de muitas fracturas neste local, que impossibilitavam a extracção rentável de grandes blocos, a lavra foi deslocada, passando a ser feita cerca de 200 m mais para norte (Fig. IV.1). É de realçar que no local de medição existem quatro fracturas de grandes dimensões com uma direcção NE-SW.

A rocha da pedreira tem aspecto bastante homogéneo, com textura granular, não porfiróide, de grão médio e uma associação mineralógica composta por quartzo, feldspato potássico, plagioclase e proporções equivalentes de moscovite e biotite. Por vezes, as micas apresentam uma orientação preferencial, definindo uma foliação de fluxo magmático com direcção N-S, concordante com as estruturas regionais. Ocasionalmente, encontram-se ainda alguns agregados de biotite (“schlieren”) dispersos na rocha e vários filões de quartzo, aplito e pegmatito de espessura e extensão variáveis.

A Estação 2 situa-se nas proximidades de uma bomba de combustível, na berma da estrada para Quixadá (estrada CE-265) (Fig. IV.2). Corresponde a um afloramento de um quartzo-monzonito do Batólito tardi-tectónico de Quixadá, designado na literatura por fácies Quixadá (ver Capítulo II, Fig. II.8). É composto maioritariamente por cristais de plagioclase, anfíbola e biotite, com dimensões até 10 mm. Na matriz, de granulação fina e cor cinza esverdeada, predomina o quartzo e o feldspato potássico. Os minerais estão orientados, segundo o azimute N039°. No afloramento são visíveis alguns encraves, com formas alongadas e dispostos paralelamente à foliação da rocha. Observam-se também alguns agregados de anfíbola e domínios de concentração de cristais de feldspato.

No local estudado, o quartzo-monzonito de Quixadá está cortado por numerosos filões de microgranitos e de pegmatitos. As fracturas afectam quer a fácies principal, quer os filões, mas são muito mais evidentes nos últimos. As medidas efectuadas foram feitas nos filões.

Por fim, englobaram-se na Estação 3 todos os afloramentos da fácies Serra Branca (Batólito de Quixeramobim) em que foram feitas medições da fracturação. As principais características macroscópicas desta unidade já foram descritas no Capítulo III.

Para classificar o estado de alteração dos afloramentos das três estações seguiram-se os critérios e a terminologia da *International Society for Rock Mechanics – ISRM* (Tabela IV.2). As rochas das três estações só apresentam sinais de alteração nas proximidades das fracturas, onde a circulação de água e a acumulação de matéria orgânica é maior. Assim, do ponto de vista do estado de alteração, todos os afloramentos em causa podem ser incluídos na categoria dos maciços rochosos pouco alterados (W_2).

Tabela IV.2 - Classificação do grau de meteorização dos maciços rochosos (ISRM, 1981).

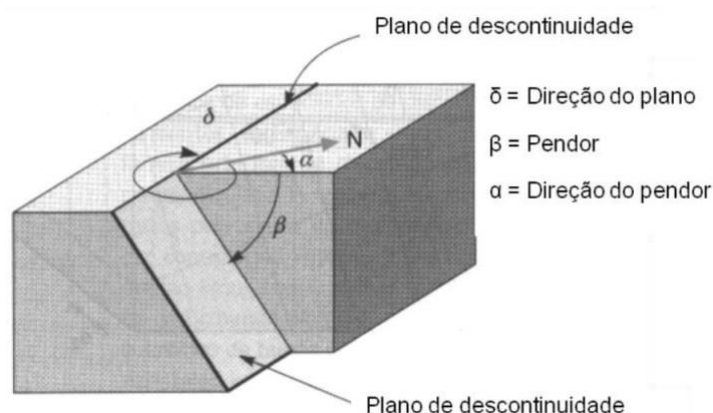
Símbolos	Designações	Descrição
W_1	São	Sem quaisquer sinais de alteração.
W_2	Pouco alterado	Sinais de alteração apenas nas imediações das descontinuidades.
W_3	Medianamente alterado	Alteração visível em todo o maciço rochoso mas a rocha não é friável.
W_4	Muito alterado	Alteração visível em todo o maciço e a rocha é parcialmente friável.
W_5	Decomposto	O maciço apresenta-se completamente friável, praticamente com comportamento de solo.

IV.3 ESTUDO DA FRACTURAÇÃO E OBTENÇÃO DE DADOS

A metodologia e os parâmetros geológico-geotécnicos usados para a descrição das diaclases dos granitóides em estudo teve por base as normas da ISRM (1977 e 1981). O trabalho de campo realizado envolveu o registo da orientação, espaçamento e continuidade das diaclases. A obtenção de valores de outros parâmetros, como a rugosidade, abertura e preenchimento, não foi efectuada.

Atitude ou orientação

A determinação da orientação de um plano de diaclase requer o uso de uma bússola para a obtenção da direcção e do pendor (ou inclinação) do plano. A direcção é o ângulo entre a linha horizontal contida no plano e o norte geográfico, enquanto o pendor corresponde ao valor do ângulo de declive máximo da superfície (ângulo β na Fig. IV.3). O pendor é medido com o clinómetro da bússola, num plano vertical perpendicular à direcção da descontinuidade.

**Figura IV.3** – Esquema mostrando os ângulos de direcção, pendor e direcção do pendor de um plano. Extraído de Vallejo et al. (2002).

Uma boa caracterização do maciço rochoso requer que sejam efectuadas numerosas medições para que se possa fazer uma análise fidedigna dos dados de orientação. Geralmente, esta análise é feita através da representação dos dados em diagramas de roseta e projecções estereográficas.

O diagrama de roseta consiste num histograma circular que permite a imediata visualização das direcções dominantes das discontinuidades, apesar de não representar a inclinação dos planos. A quantidade de dados para um intervalo de direcções é dada pelo comprimento da respectiva pétala, desde o centro (0%) até a periferia (100%).

Já na projecção estereográfica os dados de orientação de estruturas planares e lineares são representados tendo em conta a direcção e o pendor. Se a quantidade de dados de orientação for grande, representam-se os pólos das diaclases (linhas perpendiculares aos planos), aparecendo na projecção estereográfica como pontos situados no quadrante diametralmente oposto ao pendor do plano (Fig. IV.4).

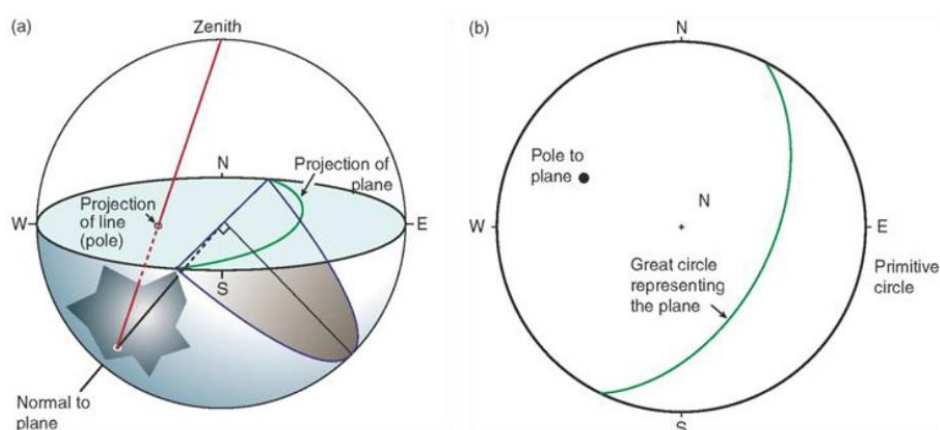


Figura IV.4 – Projecção estereográfica do polo do plano. Extraído de Fossen (2010).

Para a projecção estereográfica podem ser usadas dois tipos de redes: Wulff (rede de igual ângulo) ou Schmidt (rede de igual área), sendo a última a mais comum. A projecção dos dados pode ser feita manualmente ou através de programas informáticos.

Estes diagramas permitem definir famílias de diaclases nos maciços rochosos e determinar a sua importância relativa. Entende-se por família de diaclases o conjunto destas estruturas com, aproximadamente, a mesma orientação. A aquisição de alguns parâmetros, como por exemplo, o espaçamento, requer o conhecimento prévio das famílias existentes pelo que a obtenção dos dados de orientação deverá ser o primeiro passo no estudo da fracturação do maciço. Por outro lado, as diaclases de cada família podem apresentar características geotécnicas próprias e, por isso, a descrição dos parâmetros geotécnicos costuma ser feita família a família.

Espaçamento

O espaçamento consiste na distância média, medida na perpendicular, entre duas descontinuidades consecutivas da mesma família (Fig. IV.5). Este parâmetro determina o tamanho dos blocos que resultam da intersecção das diaclases de diferentes famílias, influenciando também a deformabilidade, a resistência e a permeabilidade do maciço. Quanto menor o espaçamento, pior a qualidade geomecânica do maciço rochoso.



Figura IV.5 – Espaçamento (linhas verdes) e continuidade (linhas vermelhas) das diaclases.

Como os valores do espaçamento apresentam geralmente alguma dispersão, os resultados obtidos para cada família de diaclases costumam ser apresentados através de histogramas de frequência. A terminologia usada para a descrição do espaçamento encontra-se na Tabela IV.3.

Tabela IV.3 – Descrição do espaçamento (Vallejo et al., 2002).

Descrição	Espaçamento (mm)
Extremamente próximas	< 20
Muito próximas	20 – 60
Próximas	60 – 200
Moderadamente afastadas	200 – 600
Afastadas	600 – 2.000
Muito afastadas	2.000 – 6.000
Extremamente afastadas	> 6.000

Continuidade

A continuidade ou persistência de uma descontinuidade refere-se ao seu comprimento na superfície de afloramento (Fig. IV.5). Como a superfície de

descontinuidade é, em geral, uma superfície de baixa resistência, quanto mais extensa mais condiciona a estabilidade do maciço rochoso.

Cada família de diaclases pode ser caracterizada em termos de continuidade através dos valores mais frequentes, de acordo com a Tabela IV.4.

Tabela IV.4 - Descrição da continuidade (ISRM, 1981).

Continuidade	Comprimento (m)
Muito baixa	< 1
Baixa	1 – 3
Média	3 – 10
Alta	10 – 20
Muito alta	> 20

Abertura e preenchimento

A abertura corresponde à distância entre as paredes adjacentes da descontinuidade. Quanto maior for a abertura, menor será a resistência ao corte e menor será a resistência ao deslizamento. O preenchimento consiste no material que ocupa o espaço da abertura, podendo ser material argiloso ou material rochoso de natureza igual ou diferente da rocha envolvente. Se for material argiloso, a resistência ao corte é baixa e a deformabilidade é elevada, ou seja, a resistência ao deslizamento será baixa.

Na classificação da abertura das diaclases utilizam-se os valores e designações que se encontram na Tabela IV.5.

Tabela IV.5 – Descrição da abertura (ISRM, 1981).

Designação	Abertura (cm)
Muito fechadas	< 0,01
Fechadas	0,01 – 0,025
Parcialmente fechadas	0,025 – 0,05
Abertas	0,05 – 0,25
Larga	0,25 – 1
Muito Larga	1 – 10
Extremamente larga	10 – 100
Cavernosa	> 100

IV.4 RESULTADOS

Após o trabalho de campo, os dados foram tratados e elaboraram-se diagramas que permitem efectuar a análise da informação recolhida.

Os dados sobre a atitude das fracturas foram trabalhados no software “RockWorks15”, usando a projecção estereográfica na rede de Schmidt. Deste modo, foi possível identificar o número de famílias de diaclases de cada estação através dos diagramas de isodensidades dos pólos dos planos das diaclases. No caso dos restantes

parâmetros, foram realizados histogramas de frequência relativos a cada uma das famílias de diaclases.

Refira-se ainda que, apesar de não se ter efectuado o registo sistemático da abertura e preenchimento das diaclases, pode ser feita uma apreciação qualitativa geral destas características. Com efeito, nos afloramentos observados, a dimensão da abertura deve situar-se entre a categoria das “fechadas” e as “muito largas” (Tabela IV.5). E o preenchimento, quando existe, consiste em pequenos fragmentos da rocha envolvente.

IV.4.1 Estação 1: Pedreira de Banabuiú (E1)

Na Estação 1 foram efectuadas 27 medições de orientação. A projecção estereográfica dos pólos permite individualizar duas famílias principais de diaclases quase perpendiculares entre si: família 1, com direcção média 045° e pendor entre 90° e 65° SE, e família 2, com orientação média 126° , 90° (Fig. IV.6). A família 1 é mais importante em termos da quantidade de diaclases do que a família 2 (1º valor próprio é 0,605). No entanto, apresenta alguma dispersão nas orientações das fracturas, reflectindo-se no valor intermédio da variância esférica (0,5533) calculado pelo programa *RockWorks15*. Refira-se ainda que o baixo valor do 3º valor próprio indica que, com os dados existentes, não é possível definir uma terceira família de diaclases importante. Assim, as diaclases do granito Banabuiú têm uma orientação oblíqua à fraca foliação de fluxo magmático do granito e às estruturas regionais (NS).

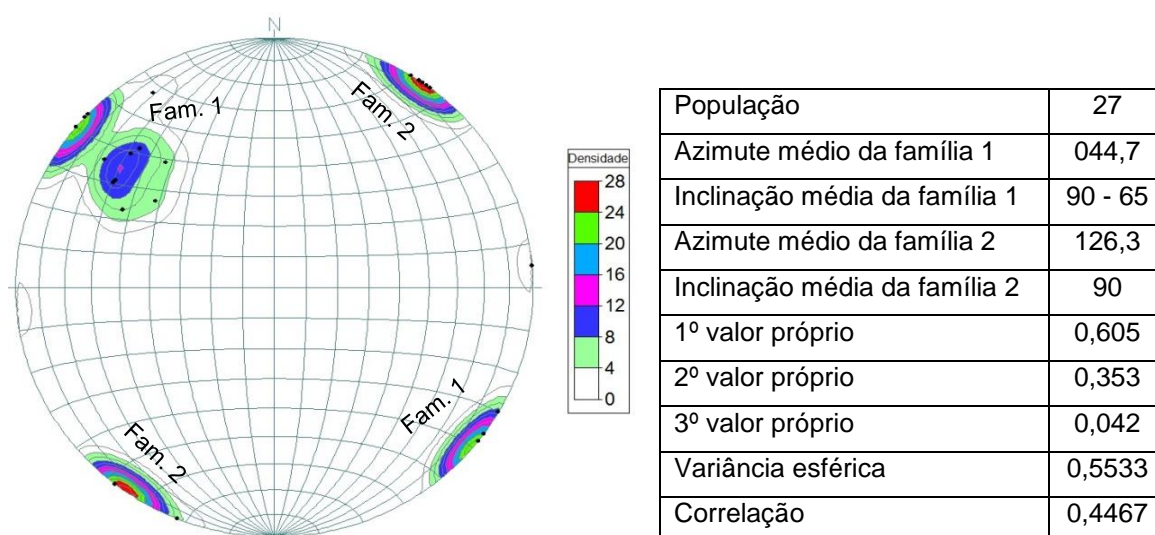


Figura IV.6 – Diagrama de isodensidades dos pólos das diaclases da pedreira de Banabuiú (E1) e tabela com a orientação média de cada família e dados estatísticos fornecidos pelo programa *RockWorks15*.

Neste local de estudo, o espaçamento entre as diaclases é irregular. No entanto, predominam os espaçamentos compreendidos entre 20 a 60 cm na família 1 (Fig. IV.7) e entre 200 a 600 cm na família 2 (Fig. IV.8). Portanto, considera-se que as descontinuidades são principalmente moderadamente afastadas a muito afastadas, sendo, por vezes, extremamente afastadas (Tabela IV.3).

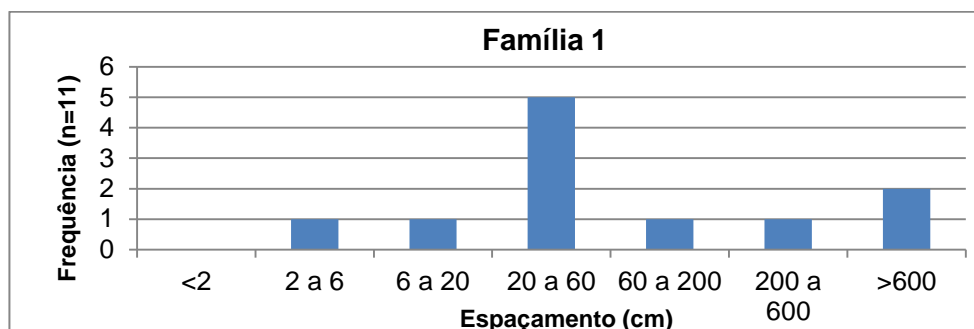


Figura IV.7 – Histograma de frequência dos espaçamentos das diaclases da família 1 na Estação 1.

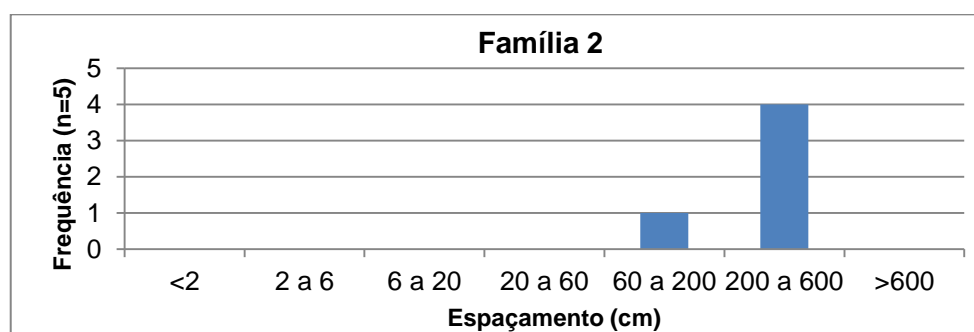


Figura IV.8 – Histograma de frequência dos espaçamentos das diaclases da família 2 na Estação 1.

Tendo em conta o leque de valores e a frequência relativa (Fig. IV.9 e Fig. IV.10), a continuidade das diaclases da pedra de Banabuiú pode ser considerada baixa a média, segundo as designações da Tabela IV.4.

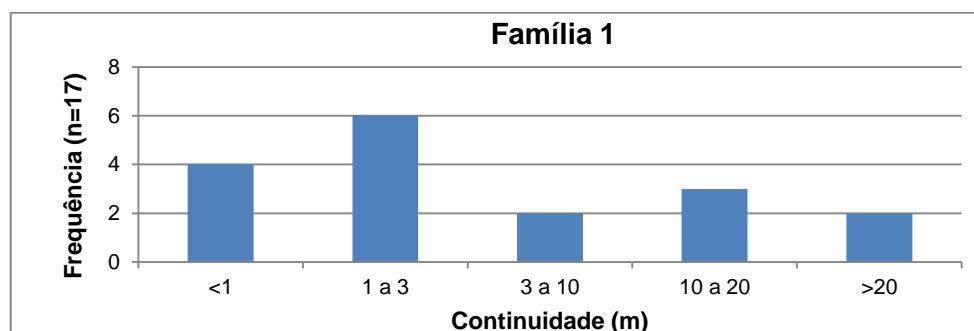


Figura IV.9 – Histograma de frequência da continuidade das diaclases da família 1 na Estação 1.

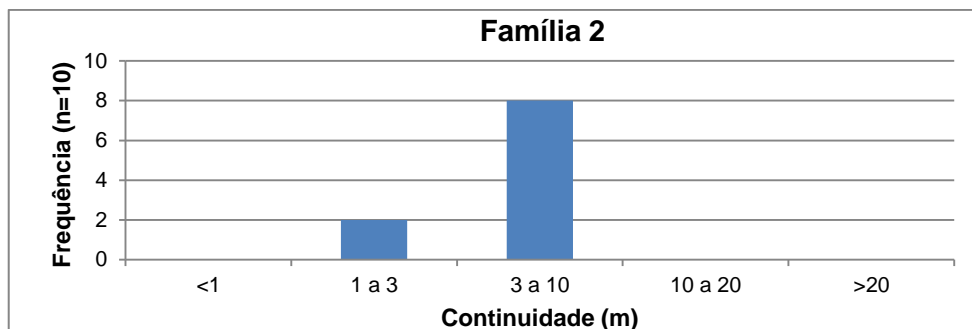


Figura IV.10 – Histograma de frequência da continuidade das diaclases da família 2 na Estação 1.

IV.4.2 Estação 2: Afloramento da fácies Quixadá (E2)

Em contraste com a pedreira de Banabuiú, as 50 fracturas medidas na Estação 2 definem uma única família de diaclases com orientação média NS, 90°. Através da figura IV.11 observa-se uma forte concentração de pólos numa única área do estereograma, sendo o 1º valor próprio (0,993) muito mais alto do que os restantes. Como praticamente não existe dispersão nas orientações, a variância esférica tem um valor baixo (0,0034). Deste modo, as diaclases dos filões intrusivos na fácies Quixadá têm uma orientação oblíqua à foliação existente nessa mesma fácies.

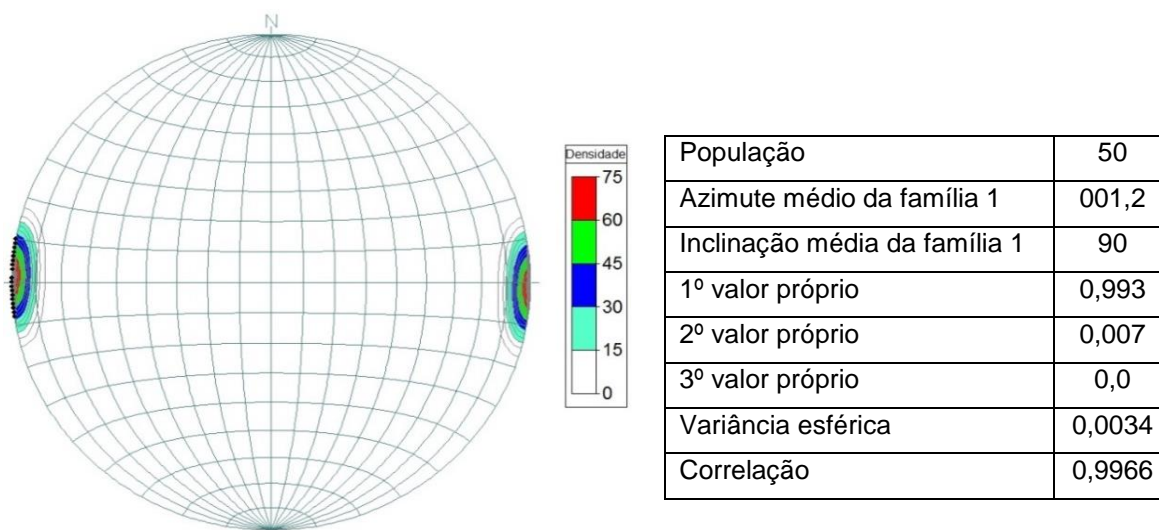


Figura IV.11 – Diagrama de isodensidades dos pólos das diaclases da Estação 2, ilustrando a definição de apenas uma família de diaclases. Do lado direito, tabela com a orientação média da família e dados estatísticos fornecidos pelo programa RockWorks15.

Os valores do espaçamento têm pouca dispersão, predominando claramente o intervalo compreendido entre 6 e 20 cm (Fig. IV.12). Assim, o espaçamento das diaclases nesta estação pode ser classificado como próximo, usando a terminologia da Tabela IV.3.

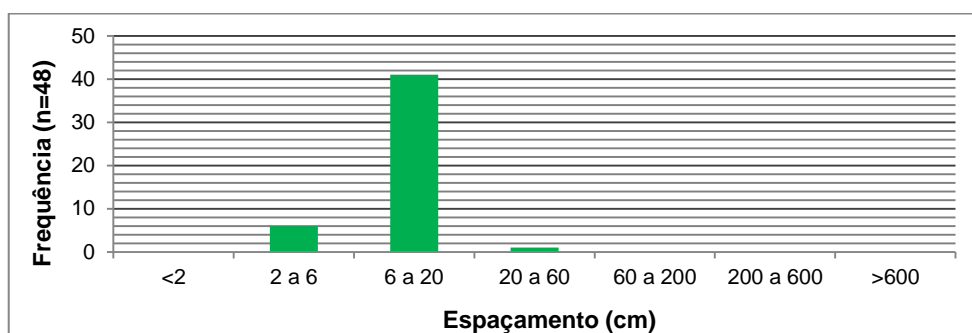


Figura IV.12 – Histograma de frequência dos espaçamentos das diaclases na Estação 2.

Quanto à continuidade, o principal intervalo de diaclases é inferior 1 m (Fig. IV.13). Assim, como existe pouca dispersão de valores pelos outros intervalos de continuidade das diaclases, a continuidade é classificada como muito baixa (Tabela IV.4).

Comparando com a estação anterior (E1), neste caso existe menos dispersão dos valores do espaçamento e da continuidade das diaclases. Atendendo a que as diaclases são aqui pouco espaçadas, a diminuição da coesão do maciço é mais acentuada, pelo que a deformabilidade e a permeabilidade do maciço deverão ser mais elevados, enquanto que a resistência será menor.

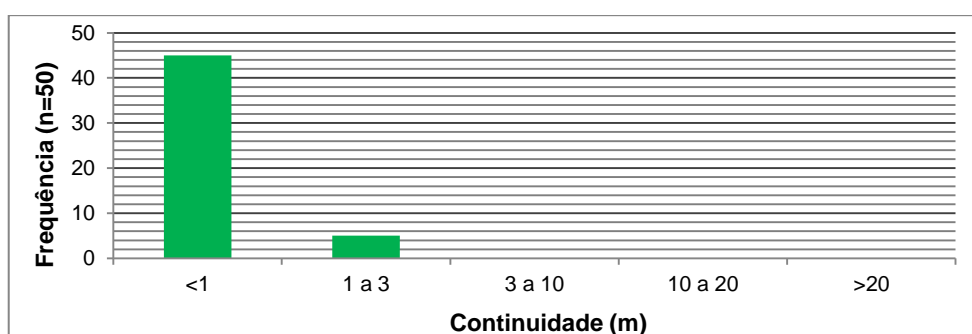


Figura IV.13 – Histograma de frequência relativo à continuidade das diaclases na Estação 2.

IV.4.3 Estação 3: Afloramentos da fácies Serra Branca (E3)

Nesta estação não se obtiveram dados relativos ao espaçamento e à continuidade das diaclases. Foram efectuadas apenas 19 medidas da orientação de diaclases. Apesar do escasso número de dados, na projecção estereográfica identificam-se, como na pedreira de Banabuiú (E1), duas famílias bem definidas (Fig. IV.14): família A, com uma orientação média 037° , 90° , e família B, com uma orientação média 147° , 90° . A família A é ligeiramente mais representativa (o 1º valor próprio é 0,579). O 3º valor próprio igual a

0,0 indica que não existe uma terceira família de diaclases. A variância esférica tem um valor elevado (0,6372), devido à dispersão dos polos nas duas famílias, sendo maior na família A. Assim, tendo em conta a orientação de fluxo magmático da fácies Serra Branca, as diaclases da família A têm a mesma orientação (NE-SW), enquanto que as diaclases da família B têm uma orientação perpendicular.

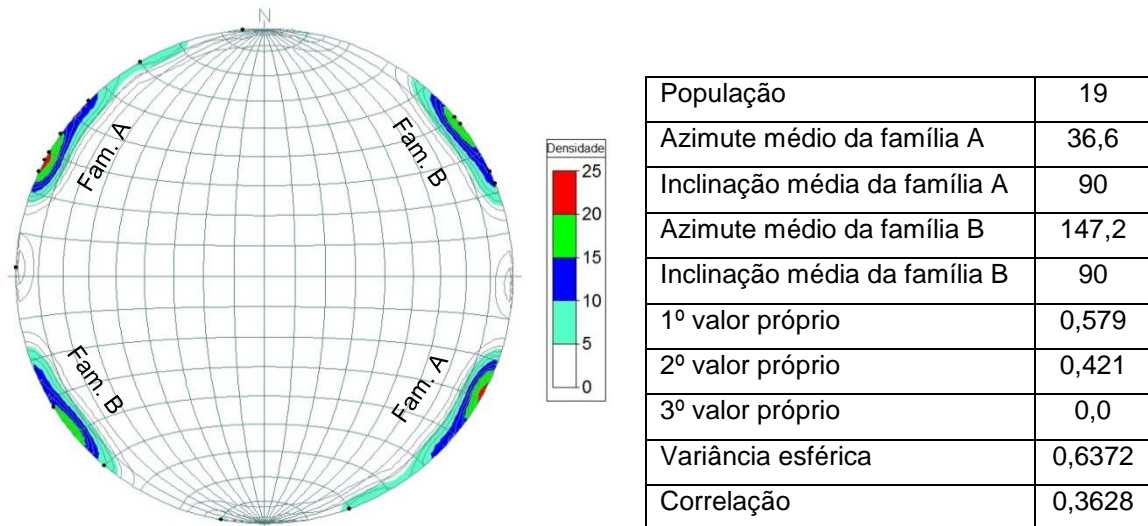


Figura IV.14 – Diagrama de isodensidades dos polos das diaclases dos afloramentos da fácies Serra Branca em Quixeramobim (Estação 3). A tabela mostra a orientação média das duas famílias e alguns dados estatísticos fornecidos pelo programa RockWorks15.

CAPÍTULO V: MATERIAIS E MÉTODOS

CAPÍTULO V: MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, descrevem-se os materiais e métodos usados durante a execução do presente estudo.

V.1 ETAPA PRÉ-CAMPO

A etapa pré-campo envolveu, numa primeira fase, as seguintes actividades: (a) selecção da área a cartografar, (b) escolha de mais duas áreas para recolha de amostras, (c) levantamento bibliográfico de trabalhos, publicações e artigos sobre a geologia das regiões em estudo e (d) consulta e interpretação dos mapas topográficos e geológicos publicados sobre essas mesmas áreas.

Numa fase subsequente, adquiriram-se imagens de satélite por download nos sites da GLCF (*Global Land Cover Facility*) e do INPE (Ministério da Ciência e Tecnologia - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), com uma órbita/ponto 217/64 do Landsat 5 (sensor TM) e do Landsat 7 (sensor ETM⁺). Obtiveram-se também imagens SRTM a partir do site da EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisas Espaciais) para a carta SB-24-V-D. A comparação das imagens com as cartas topográficas na escala 1:100.000 publicadas pela SUDENE permitiu identificar os principais aspectos da topografia e da geologia da área a cartografar.

Em seguida, procedeu-se ao tratamento das imagens satélites usando o software *ER Mapper 7.0* e produziram-se composições coloridas através de combinações multiespectrais das bandas RGB. Por fim, construiu-se um mapa preliminar em suporte *ArcGIS* com base na cartografia publicada e nas imagens disponíveis, o que envolveu a digitalização e georreferenciação das cartas, o processamento digital das imagens e a criação de shapefiles para os elementos topográficos (rede de drenagem, açudes, curvas de nível) e estruturais (estruturas, lineamentos), toponímia (povoações estradas, habitações) e geologia (principais unidades).

V.2 ETAPA DE CAMPO

Os trabalhos de cartografia geológica foram realizados em três campanhas de campo e tiveram como principal finalidade fazer o levantamento geológico de detalhe, na escala 1:25.000, de um sector com 55 km² na área de Quixeramobim. No total, foram visitados 230 pontos, para os quais se determinaram das coordenadas cartesianas UTM (*Datum WGS84*), com um dispositivo *GPS* de modelo *H-Trex* da marca *Garmin*. Para além da localização de cada ponto visitado, o trabalho de campo englobou a caracterização macroscópica da litologia aflorante, acompanhada, sempre que possível,

da identificação das paragénese minerais presentes, a recolha de dados estruturais, o registo de fotográfico e a anotação de todas as observações realizadas na caderneta de campo.

Mais tarde, foi efectuada uma quarta campanha de campo para amostragem. Durante essa campanha, foram colhidas amostras representativas dos diferentes tipos de granitóides presentes na área, bem como do encaixante metamórfico, para estudo petrográfico. Colheram-se ainda três amostras de cada granitóide (granito de Banabuiú, quartzo-monzonito de Quixadá e monzogranito de Serra Branca), com dimensões em torno de 40 x 40 x 30 cm, para confecção de provetes e determinação das suas propriedades físico-mecânicas e radiométricas.

V.3 ETAPA PÓS-CAMPO

A etapa pós-campo incluiu quatro fases: (a) estudo petrográfico, (b) ensaios laboratoriais, (c) preparação do mapa final em suporte *ARCGIS* e (d) interpretação dos resultados e redacção da tese.

V.3.1. Caracterização Petrográfica

O estudo petrográfico foi realizado no Laboratório de Microscopia Óptica do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará (UFC) e no Laboratório de Petrologia e Mineralogia do Departamento de Geociências da Universidade de Aveiro (UA), usando um microscópio óptico de luz transmitida de marca *Leica* e modelo *EC 3* (UFC) e um microscópio petrográfico de marca *Olympus* e modelo *BX50* (UA).

Na descrição das lâminas delgadas das amostras para eventual uso como rochas ornamentais, seguiram-se os procedimentos estipulados na norma técnica brasileira NBR 15.845 (Anexo A – ABNT, 2010) e as orientações de Navarro (1998, 2002), Rodrigues *et al.* (1996, 1997) e Artur *et al.* (2001), tendo o cuidado de incluir o seguinte tipo de informação: (a) composição mineralógica; (b) textura; (c) estrutura; (d) composição modal e (e) produtos de alteração. Estes dados constituem, em conjunto com as evidências de campo, a cartografia geológica e a caracterização fotogeológica, um forte alicerce para a interpretação dos ensaios tecnológicos e radiométricos subsequentes.

As observações ao microscópio óptico de luz transmitida foram realizadas com objectivas de ampliações 4X, 10X, 20X e 40X. Para além da descrição mineralógica, textural e da análise modal, determinou-se também o grau de alteração médio e o índice de microfissuramento (a partir da média aritmética de microfissuras intergrão e intragráo por mm²).

Na caracterização petrográfica das amostras, usaram-se os seguintes critérios para classificação dos parâmetros texturais, grau de alteração e índice de microfissuramento:

a) Granulometria da rocha:

- densa: diâmetro médio dos cristais inferior a 0,5 mm;
- fina: diâmetro médio predominante entre 0,5 e 1,0 mm;
- média a fina: diâmetro médio predominante entre 1 e 3 mm;
- média: diâmetro médio predominante entre 3 e 7 mm;
- média a grossa: diâmetro médio predominante entre 7 e 10 mm;
- grossa: diâmetro médio dos grãos maior que 10 mm.

b) Distribuição de tamanhos de grão:

- equigranulares: constituídas por cristais sensivelmente do mesmo tamanho ou variando dentro de uma faixa muito estreita de dimensões;
- inequigranulares: rochas cujos grãos minerais diferem de tamanho, mas em que a relação entre as dimensões dos grãos menores e maiores não excede 1:5;
- porfiróides: rochas com megacristais, de dimensões pelo menos cinco vezes superiores à média dos grãos da matriz, destacando-se nitidamente no seio da matriz.

c) Tipo de contactos entre grãos: planos; plano-lobulares; serrilhado (plano, irregular ou côncavo); côncavo-convexos; denteados; engrenados; esgarçados (Fig. V.1).

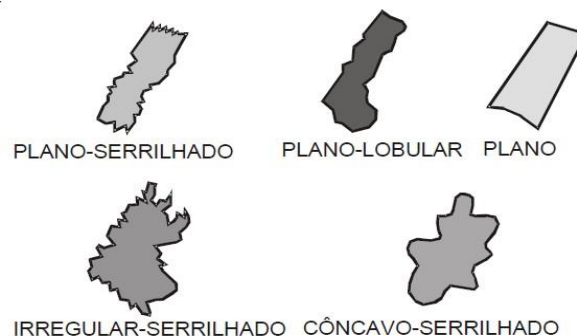


Figura V.1 - Exemplo de tipos de contactos considerados (extraído de Costa, 2007).

d) Grau de alteração: O grau de alteração das amostras foi quantificado através da presença de paragéneses minerais, resultantes de processos de alteração visíveis em lâmina delgada (e.g. sericitização ou saussuritização da plagioclase, sericitização e/ou formação de argilominerais no feldspato potássico,

cloritização da biotite, uralitização de piroxenas, formação de óxidos e hidróxidos secundários etc.), de acordo com as seguintes especificações (Navarro, 2002):

- Grau de alteração intenso: > 60%;
- Grau de alteração moderado: 30 a 60%;
- Grau de alteração incipiente: 10 a 30%;
- Grau de alteração muito incipiente: 5 a 10%;
- Ausente: < 5%.

e) Índice de microfissuramento: Este índice foi determinado a partir da média aritmética do número de microfissuras intergrão e intragrão por mm² observadas em lâmina delgada. A contagem foi feita com a objectiva de 10X. Classificaram-se ainda as microfissuras em termos de:

- vazias ou preenchidas;
- localização relativa (inter ou intragrãos);
- presença ou ausência de orientações preferenciais;
- tipo de preenchimento e comunicabilidade entre si.

V.3.2 Ensaios laboratoriais

Os ensaios laboratoriais realizados tiveram como principal objectivo determinar um conjunto de propriedades físicas e mecânicas que permitissem avaliar a qualidade das amostras para exploração como rochas ornamentais ou de revestimento segundo as normas em vigor (ABNT NBR 15845/2010, ASTM D 2845/1990 e ABNT NBR 12042/1992). Para além disso, procedeu-se ainda à caracterização radiométrica das amostras com o intuito de determinar a sua radioactividade.

V.3.2.1 Índices Físicos (NBR – 15.845, 2010)

Os índices físicos para caracterização tecnológica de rochas ornamentais incluem a massa específica aparente (seca e saturada), a porosidade aparente e a absorção de água. A sua determinação permite diagnosticar e avaliar o estado físico dos materiais, ou seja, o seu estado de alteração, o que condiciona a sua resistência e susceptibilidade a novas condições e ambientes.

A determinação destes parâmetros foi feita no laboratório, usando 10 provetes com dimensões de cerca de 5 cm X 5 cm X 5 cm e pesos variando entre 360 – 405 g (Fig. V.2). Os provetes foram inicialmente lavados e colocados numa estufa à temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$, durante 24 horas. Em seguida, retiraram-se da estufa e deixaram-se arrefecer durante, pelo menos, 30 minutos, após o que se procedeu à sua

pesagem (peso seco - massa A). Depois da pesagem, colocaram-se os provetes em água destilada durante 24 horas, à temperatura ambiente. Ao fim deste tempo, retiraram-se os provetes e procedeu-se à limpeza das superfícies e à sua pesagem (peso saturado – massa B). Por fim, foram novamente imersos num recipiente com água destilada e pesados (com os provetes suspensos e presos sobre a balança por um fio *nylon*) e obteve-se a massa C (peso submerso). A partir da média aritmética dos 10 valores obtidos no ensaio, calcularam-se os índices físicos através das seguintes expressões:

$$\rho_{seca} = A / (B - C) \rightarrow (g/cm^3);$$

$$\rho_{sat.} = B / (B - C) \rightarrow (g/cm^3);$$

$$\text{Porosidade} = ((B - A) / (B - C)) \times 100 \rightarrow (\%);$$

$$\text{Absorção de água} = ((B - A) / A) \times 100 \rightarrow (\%).$$



Figura V.2 – Determinação dos índices físicos: (A) Colocação dos provetes na estufa; (B) Ensaio para o parâmetro submerso.

V.3.2.2 Resistência à Compressão Uniaxial Simples (NBR – 15.845, 2010)

O valor da resistência à ruptura por compressão uniaxial simples é indicativo da resistência das rochas quando submetidas a uma carga aplicada na sua superfície e fornece informação relevante sobre a robustez e qualidade dos materiais. A resposta mecânica da rocha depende da sua composição mineralógica, textura, estado de alteração e porosidade (Iamaguti, 2001).

Neste ensaio, usaram-se provetes cúbicos com dimensões em torno de 7 X 7 X 7 cm. Para as amostras das fácies Quixadá e Serra Branca foram preparados 10 provetes (5 paralelos à foliação e 5 perpendiculares), enquanto para as do granito Banabuiú se utilizaram apenas 6 provetes. O primeiro passo do procedimento consistiu em lavar os provetes e secar numa estufa a 110°C durante 24 h. Em seguida, cada um dos provetes foi colocado sobre o prato duma prensa hidráulica com capacidade de 200 toneladas,

onde foram sujeitos à aplicação de uma carga uniforme com um incremento contínuo (600 kPa/s) até atingirem a ruptura (Fig.V.3). A tensão de ruptura foi calculada através da seguinte fórmula:

$$\sigma_c = P/A$$

em que:

σ_c = Resistência à compressão uniaxial (MPa);

P = Carga de ruptura (KN);

A = Área da secção transversal do provete (m²).

Segundo as recomendações de “*Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses* – ISRM (1977), as rochas podem ser classificadas em várias categorias em função da sua resistência à compressão uniaxial (Tabela V.1).

Tabela V.1 - Classificação de rochas quanto à resistência à compressão uniaxial (ISRM, 1977).

σ_c (MPa)	Classificação
< 1	Extremamente branda (solo)
1 – 5	Muito branda
5 – 25	Branda
25 – 50	Resistência média
50 – 100	Resistente
100 – 250	Muito resistente
> 250	Extremamente resistente

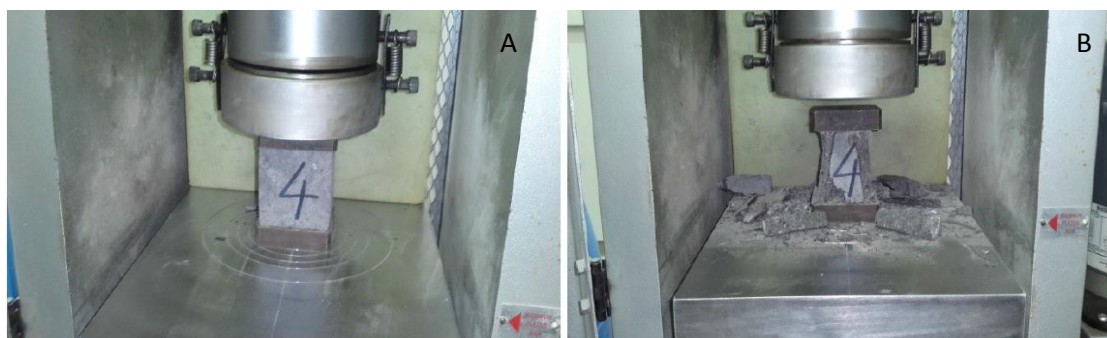


Figura V.3 – Colocação de provetes na prensa: (A) Antes da aplicação compressão; (B) Após a ruptura (extraído de Silva, 2010).

V.3.2.3 Resistência à Flexão em Três Pontos (NBR – 15.845, 2010)

O ensaio de resistência à flexão permite determinar a resistência de um corpo a esforços flectores (compressão e tracção), através da aplicação de uma carga pontual na sua superfície (Iamaguti, 2001). O ensaio consiste em colocar um provete sobre dois

cutelos inferiores espaçados de 18 cm e aplicar progressivamente uma força no centro do provete, um incremento contínuo de 4.500 N/min, até que este atinja o ponto de ruptura (Figura V.4). Procede-se em seguida à medição da força máxima exercida e calcula-se a resistência à flexão através da seguinte expressão:

$$\sigma_1 = 3PL/2bd^2$$

em que:

σ_1 = tensão de ruptura (MPa);

P = força de ruptura (KN);

L = distância entre os cutelos de reacção (m);

b = largura do provete (m);

d = altura do provete (m).

Para determinar a resistência à flexão das amostras das fácies Quixadá e Serra Branca usaram-se 10 provetes prismáticos (5 paralelos à foliação e 5 perpendiculares), enquanto no caso do granito Banabuiú utilizaram-se apenas 5 provetes prismáticos. Todos os provetes tinham dimensões em torno de 20 X 10 X 5 cm e foram lavados e colocados numa estufa a 110°C durante 24 horas, antes do início do ensaio.



Figura V.4 – Prensa para ensaio de resistência à flexão em 3 pontos (extraído de Silva, 2010).

Os resultados obtidos neste tipo de ensaio permitem estimar a espessura com que devem ser cortadas as placas para utilização em fachadas e revestimentos (Costa, 2007).

V.3.2.4 Desgaste por Abrasão Amsler (NBR – 12.042, 1992)

O ensaio de resistência à abrasão consiste em submeter material rochoso à acção mecânica e determinar a resistência da rocha aos processos de fragmentação. O ensaio

é efectuado com um equipamento “*Amsler*”, que permite medir a redução em altura (em mm) que o provete sofre depois de realizar um percurso abrasivo circular de 500 m (250 voltas), seguido de outro de 500 m, através de areia fina siliciosa (Fig. V.5).

Para o efeito, usaram-se provetes com dimensões de 7 X 7 X 2,5 cm. Foram preparados quatro provetes para os granitóides de Quixadá e Serra Branca (2 paralelos à foliação e 2 perpendiculares) e dois provetes para o granito Banabuiú. Numa primeira fase, tiraram-se as medidas das faces dos provetes com o auxílio de um micrómetro (relógio comparador), tendo o cuidado de as numerar e de seleccionar previamente as superfícies que não seriam sujeitas a desgaste. Em seguida, fixaram-se os provetes nas sapatas do equipamento *Amsler* de modo a ficarem em contacto com um anel de ferro fundido com um perímetro de 2 metros (superfície de abrasão) e poderem girar em torno do seu próprio eixo. Os provetes foram então sujeitos a uma velocidade de rotação de $0,6 \pm 0,02$ rp, durante um percurso abrasivo de 500 m (250 voltas), após o que se retiraram do aparelho. Depois de limpos e medidos, foram novamente colocados no equipamento, na posição invertida (Fig. V.5). Após uma nova rotação de 500 m, foram retirados, limpos e efectuaram-se novas medições. As medidas obtidas em cada um dos ciclos abrasivos permitem calcular a redução de espessura (mm) através das seguintes expressões:

$$d = a - b$$

$$e = a - c$$

onde:

a = Altura inicial média das 4 faces (mm);

b = Altura média das 4 faces (mm) após 500 metros;

c = Altura média das 4 faces (mm) após 1000 metros;

d = Desgaste médio após 500 metros (mm);

e = Desgaste médio após 1000 metros ou Desgaste *Amsler* (mm).



Figura V.5 – (A) Medidor da espessura do provete no ensaio de desgaste; (B) Equipamento *Amsler*, usado no ensaio de desgaste abrasivo.

V.3.2.5 Velocidade de Propagação de Ondas Ultra-Sónicas (ASTM – D2845/90)

A determinação de velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas é um ensaio não destrutivo que permite estimar as condições físicas dos provetes, através das variações de velocidade de propagação das ondas longitudinais de compressão e de cisalhamento na rocha (v), num percurso (d), que é infinito, na sua extensão lateral (Fig. V.6).

Tal como nos ensaios anteriores, os provetes usados neste ensaio foram inicialmente lavados e secos numa estufa a 110° C, durante 24 horas. Em seguida, retiraram-se da estufa e deixaram-se arrefecer à temperatura ambiente. Seleccionaram-se então as faces em que iriam ser feitas as medições, aplicou-se o transdutor emissor (sonda de cristal piezoeléctrico) numa das faces escolhidas e o transdutor receptor na face oposta, de forma a ficarem alinhados. Posto isto, mediu-se o tempo (t) que o feixe ultra-sónico demorou a atravessar a amostra e calculou-se a velocidade de propagação através da fórmula:

$$V \text{ (seca)} = d/t$$

em que:

V (seca) = velocidade no material seco (m/s);

d = distância percorrida (mm);

t = tempo (ms).



Figura V.6 - Aparelho para medição da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas (extraído de Godoy & Silva Duarte, 2012)

V.3.2.6 Caracterização Radiométrica

A radioactividade natural representa 81% da dose total anual de radioactividade recebida pela população. O radão exalado pelos materiais geológicos contribui com cerca de 55% para esse total (ICRP 60, 1991), embora haja outras fontes naturais cuja contribuição também é muito importante, como é o caso dos raios cósmicos e do ^{40}K (\approx

26%, Fig. V.7). Os 19% restantes advêm de fontes artificiais de radiação, sendo a mais relevante a que é causada pela exposição aos raios X para fins médicos. As doses provenientes do ciclo dos combustíveis nucleares usados na produção de energia eléctrica são muito pequenas, quando comparadas com as demais (Fig. V.7; ICRP 60, 1991).

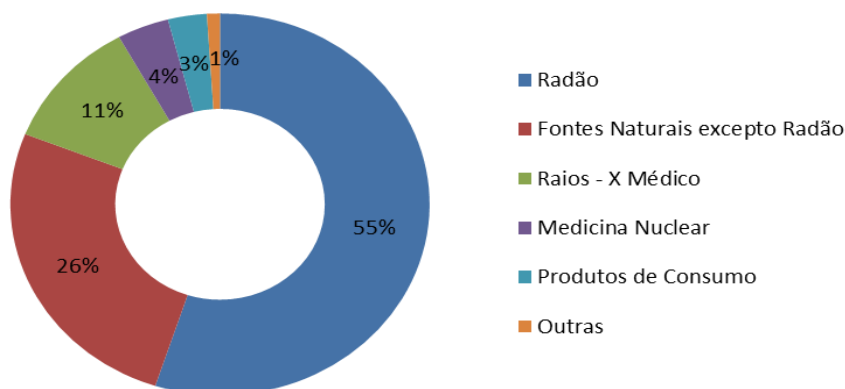


Figura V.7 – Principais fontes de radiação (ICRP 60, 1991).

De uma forma geral, as rochas apresentam uma baixa actividade radiométrica. No entanto, o seu uso crescente como material ornamental e de revestimento tem causado alguma apreensão na população, sobretudo, na dos países mais desenvolvidos. Por isso, a investigação dos mecanismos da transferência dos elementos radioactivos em diferentes meios e as técnicas de quantificação da radioactividade têm vindo a ganhar cada vez mais importância, nomeadamente no sector dos materiais de construção.

Os radionuclídeos naturais podem ser fontes de exposição interna, como é o caso da inalação do gás radão, ou externa, de que é exemplo a emissão dos raios gama penetrantes. Para se determinar as suas concentrações recorre-se à análise da espectrometria de raios gama e da exalação de radão (Fathivand, 2006).

V.3.2.6.1 ESPECTROMETRIA DE RAIOS GAMA

Neste estudo, usou-se a espectrometria de raios gama para determinar a quantidade dos isótopos ^{226}Ra , ^{232}Th e ^{40}K existente nas rochas em estudo e poder aferir em que medida a sua utilização como rochas ornamentais e/ou de revestimento trazia riscos para a saúde humana.

Trata-se de um ensaio que permite identificar a presença de radionuclídeos em amostras emissoras de radiação gama e quantificar a sua actividade, através da análise do espectro. Como os raios gama têm uma capacidade de penetração muito superior à da restante radiação devido à ausência de massa, é necessário usar contentores com um

revestimento que contenha os seus efeitos, usualmente de chumbo (Ivanovich & Murray, 1992).

Quando um isótopo instável (ou radioactivo) se desintegra naturalmente para um isótopo mais estável, liberta radiação. Essa “transformação” denomina-se actividade da amostra e é medida em Bq – Becquerel (uma desintegração por segundo). A partir dos valores das actividades dos isótopos ^{226}Ra , ^{232}Th e ^{40}K , pode calcular-se a radioactividade natural das amostras, expressa em termos da actividade de rádio equivalente (Ra_{eq}) e determinar o índice de risco de radiação externa (H_{ext}) e o índice de concentração da actividade gama (I).

A radioactividade natural das amostras, definida pela actividade equivalente de rádio (Ra_{eq}), em Bq/kg, é calculada através da equação:

$$Ra_{eq} = C_{226Ra} + (1.43 \times C_{232Th}) + (0.077 \times C_{40K})$$

Para efeitos de utilização em materiais de construção para habitações, recomenda-se que a actividade equivalente de rádio (Ra_{eq}) seja inferior a 370 Bq/kg (Somlai *et al.*, 1998; Unscear, 1982; Fathivand, 2006).

O índice de risco de radiação externa (H_{ext}), formulado por Beretka *et al.* (1985) e Hayumbu *et al.* (1995) é dado pela seguinte expressão:

$$H_{ext} = (C_{226Ra}/370) + (C_{232Th}/260) + (C_{40K}/4810) \leq 1$$

Para este parâmetro, aconselha-se um limite de $H_{ext} < 1$ para utilização em materiais de construção (Sharaf *et al.*, 1999).

Por fim, o índice de concentração da actividade gama (I) está directamente correlacionado com a dose efectiva gama e pode ser determinado por intermédio da seguinte fórmula:

$$I = (C_{Ra}/300) + (C_{Th}/200) + (C_{K}/3000)$$

Este índice é frequentemente usado para estabelecer o tipo de utilização em que podem ser aplicados os materiais rochosos sem perigosidade para a saúde pública. Mostram-se na Tabela V.2, os valores recomendados:

Tabela V.2 – Valores recomendados do índice de concentração de actividade gama (I) e da dose efectiva gama para diferentes tipos de utilização (extraído de European Commission, 1999).

Critério de dose	1 mSv/a
Materiais usados em meios internos, ex: cimento.	$I \leq 1$
Materiais usados em meios externos, ex: telhas, placas.	$I \leq 6$

A preparação das amostras para este ensaio envolveu as seguintes fases:

- 1- Corte das amostras de rocha com uma serra de modo a obter fragmentos com tamanhos entre 0,5 e 2 cm. Remoção das porções alteradas.
- 2- Passagem dos fragmentos de rocha num britador de maxilas de marca *Retsch* na posição de menor abertura. Após 4 passagens, o material britado alcançou uma granulometria em torno de 200 mesh (Fig. V.8 A).
- 3- Peneiramento da amostra com um crivo de 200 mesh (Fig. V.8 B).
- 4- Quarteamento da fracção inferior a 200 mesh até se obter cerca de 600 gramas de material, que foi colocado em recipientes de plástico (*beaker*).
- 5- Colocação das amostras em repouso por 30 dias até se atingir o equilíbrio radioactivo entre o ^{226}Ra e os seus isótopos-filhos de curta meia-vida.
- 6- Leitura da amostra no sistema espectrométrico gama.



Figura V.8 – (A) Britador de maxilas Retsch; (B) Quartilha das amostras.

O sistema espectrométrico gama é revestido a chumbo e contém um pré-amplificador e um cristal cintilador de iodeto de sódio (NaI) activado com tálio (Tl), ligados a uma fonte de alta tensão (Fig. V.9). A radiação gama emitida pela fonte radioactiva interage com o cristal cintilador de NaI(Tl), produzindo pulsos de pequena amplitude no anodo de uma fotomultiplicadora, sendo detectados pelo amplificador. Depois o sinal é conduzido para o multicanal ligado ao microcomputador que processa o sinal efectuando a sua contagem (Bonotto, 1990; Duarte, 2002).



Figura V.9 – Espectrómetro de raios gama da EG & G – ORTEC do Laboratório de Radioactividade Natural do Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra.

V.3.2.6.2 Exalação de Radão

O ensaio de exalação de radão permite calcular a quantidade de gás radão (^{222}Rn) que é libertado pelas rochas para a atmosfera. A partir dos valores obtidos é possível definir se uma dada rocha cumpre ou não os requisitos necessários para ser utilizada como rocha ornamental e/ou de revestimento.

A actividade do ^{222}Rn (Bq/m^3) pode ser medida de uma forma passiva ou activa, dependendo de requerer ou não fornecimento de energia eléctrica ao sistema. Para determinar a actividade do ^{222}Rn são usados os seguintes tipos de equipamento: detectores de traço alfa, dispositivos de absorção de carvão activado ou o monitor AlphaGUARD.

No presente trabalho usou-se o monitor AlphaGUARD (Fig. V.10). Trata-se de um sensor de amostragem activa contínua, composto por uma câmara de ionização, que permite detectar os isótopos: ^{222}Rn e ^{220}Rn produzidos por decaimento alfa e medir as concentrações de radão a longo prazo (Swakon *et. al.*, 2004). Para além da medição das concentrações de radão a longo prazo por espectroscopia alfa 3D, o equipamento regista também a humidade relativa, a temperatura ambiente e a pressão atmosférica. Como a difusão do radão na câmara de ionização não é um processo instantâneo, o sinal chega com atraso. Se ocorrer qualquer variação na concentração de radão, o equipamento demora 10 minutos a alcançar 30% do novo valor e 30 min para atingir 90%. A sensibilidade de medição varia entre 2 a $2.000.000 \text{ Bq/m}^3$ (0,05 a 50.000 pCi/l).

Na realização do ensaio, seguiu-se a metodologia proposta por Gómez *et al.*, 2011, segundo a qual a taxa de exalação de radão pela superfície da amostra para o ar circundante é determinada a partir do fluxo ($\text{Bq/m}^2/\text{h}$) através da equação:

$$F = (V_l / (A_{pl} \times T)) \times (C_m - C_{rn-Bk})$$

onde V_l é o volume livre do contentor de medição (m^3), A_{pl} - a área da placa a ser medida (m^2), T - o tempo que a amostra esteve no contentor (h), C_m - a actividade específica do radão (Bq/m^3) e C_{rn-Bk} - o background da actividade específica do radão (Bq/m^3).



Figura V.10 – Detector de radão AlphaGUARD usado para medir os contentores.

A preparação das amostras para este ensaio incluiu os seguintes passos:

- 1- Cortaram-se 4 placas prismáticas (20 X 10 X 2,5 cm) para cada um dos três litotipos em estudo
- 2- Acondicionaram-se as amostras em contentores com uma capacidade de 12 litros, que foram subsequentemente lacrados, tendo o cuidado de fechar as válvulas de saída e entrada de ar para o sistema.
- 3- Após 16 dias, ligaram-se os contentores, através das válvulas, à bomba e ao detector AlphaGUARD e procedeu-se à leitura dos resultados no computador. Para permitir que o software *DataEXPERT* leia os dados no computador deve manter-se a bomba ligada durante 15 minutos.
- 4- Antes de analisar a amostra seguinte, a bomba e o detector AlphaGUARD devem ser ligados ao exterior durante 5 minutos para expulsar o radão e evitar contaminações.

V.3.3 Tratamento e Interpretação dos Dados

Com base na informação geológica e estrutural obtida durante as campanhas de campo, elaborou-se o mapa geológico final, usando o suporte informático “ARCGIS” versão 9.3.1 (ESRITM). Procedeu-se, em seguida, à compilação, tratamento e interpretação dos dados laboratoriais, o que envolveu a construção de tabelas, diagramas, figuras e gráficos ilustrativos e o estudo aprofundado dos tópicos a tratar. Por fim, redigiu-se a dissertação.

CAPÍTULO VI:
CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA E
RADIOMÉTRICA

CAPÍTULO VI: CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA E RADIOMÉTRICA

Este capítulo inicia-se com uma breve síntese sobre a importância do sector de rochas ornamentais e de revestimento na economia do Brasil, apresentando-se, em seguida, as principais características petrográficas, físico-mecânicas e radiométricas de três amostras de granitóides Brasileiros (Banabuiú, Quixadá e Serra Branca) do Estado Ceará (Brasil). Com o intuito de avaliar as potencialidades de cada um dos litótipos para exploração como rochas ornamentais, seguiram-se os procedimentos estipulados nas normas técnicas usadas para o efeito (ver capítulo V) e compararam-se os resultados obtidos com os valores recomendados por Frazão & Farjallat (1995) e ASTM C-615 (1992).

VI.1 SÍNTESE ECONÓMICA DO SECTOR

O termo rochas ornamentais e de revestimento (pedras naturais, pedras dimensionadas ou materiais de cantaria) designa qualquer tipo de matéria-prima de origem mineral que pode ser usada como material de construção com funções essencialmente decorativas. A sua função decorativa constitui, aliás, um elemento essencial na definição de rocha ornamental. Cabe referir ainda que, na nomenclatura comercial, as rochas ígneas intrusivas ou metamórficas com textura granular são genericamente apelidadas de “granitos” e as rochas sedimentares carbonatadas (calcários) classificadas, conjuntamente com o seus equivalentes metamórficos, como “mármore”.

Devido às suas características estéticas, qualidade e durabilidade, as rochas ornamentais têm vindo, desde há séculos, a ser utilizadas na construção e/ou revestimento externo de edifícios, igrejas, monumentos e conjuntos arquitectónicos de diversos estilos. É de destacar ainda a sua aplicação decorativa no revestimento de pavimentos, escadas, paredes e guarnecimento, na escultura e na confecção de peças de arte funerária.

O processo de produção de pedra natural envolve duas fases principais: a extracção de blocos ou placas, com medidas e formas comercialmente especificadas e a sua subsequente transformação, i.e., o corte e acabamento de peças e produtos para colocação no mercado. Num sector em que a inovação é um factor decisivo para a competitividade, o desenvolvimento de novas soluções para a extracção de pedra e a modernização das tecnologias e metodologias de acabamento, processamento e

certificação dos produtos são fundamentais para potenciar a eficiência económica do sector.

Segundo Chiodi (2007), a produção mundial de rochas ornamentais e de revestimento evoluiu de 1,8 milhões de toneladas/ano em 1920, para 92,8 milhões de toneladas/ano em 2006, movimentando entre 80 a 100 bilhões de dólares/ano. O Brasil é um dos principais produtores e exportadores de rochas ornamentais do mundo (Vidal *et al.*, 2005). De acordo com a SEBRAE, o país está entre os cinco maiores produtores de rochas ornamentais do mundo, sendo responsável por 5% da produção mundial de blocos de “mármore” e “granito” e por 6% das exportações mundiais deste tipo de materiais (80% das quais como matéria-prima bruta).

Em 2001, o Brasil possuía 1300 jazidas em actividade e produziu cerca de 500 tipos comerciais de rochas ornamentais, ocupando o 4º lugar no *ranking* mundial dos países exportadores. As principais jazidas estão localizadas no sector sudeste do país, que detém aproximadamente 80% da produção nacional, com uma forte concentração no Estado do Espírito Santo. Seguem-se em importância, os Estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo, que se distinguem ainda pelo seu papel como consumidores. No nordeste do país, o Estado do Ceará ocupa uma posição de relevo, representando o 5º maior exportador nacional.

Para além do seu notável potencial geológico, o Brasil tem feito uma aposta estratégica na dinamização do sector de rochas ornamentais, investindo na criação de infra-estruturas, na modernização das técnicas de lavra, no reforço da sua capacidade de transformação e na internacionalização, o que lhe tem permitido afirmar-se, cada vez mais, tanto no mercado nacional como internacional (Vidal *et al.*, 2005, Chiodi Filho, 2010).

No entanto, a participação brasileira no total das exportações mundiais sofreu uma quebra significativa entre 2006 e 2009, como consequência da crise financeira internacional, da qual só começou a recuperar em 2010 (Tabela VI.1). O facto da economia brasileira estar fortemente dependente dos EUA e, neste caso, do seu sector imobiliário provocaram uma acentuada retracção das margens de lucro dos exportadores brasileiros e uma redução da sua capacidade competitiva face a países como a China e a Índia. Com efeito, a retracção da procura externa e a quebra dos preços internacionais afectaram profundamente a sustentabilidade das exportações brasileiras durante esse período.

Houve outros factores que contribuíram para a fragilização da posição dos exportadores brasileiros nos mercados mundiais, entre os quais são de salientar os

seguintes: (a) o aumento geral dos custos de produção; (b) as taxas alfandegárias cobradas pelas empresas brasileiras aos consumidores externos e (c) flutuação constante das taxas de câmbio (Fig. VI.1).

Tabela VI.1 – Variação da taxa de crescimento das exportações brasileiras de rochas ornamentais entre 2006 e 2010 (extraído de ABIROCHAS, 2010).

	Jan	Jan – Fev	Jan – Mar	Jan – Abr	Jan – Mai	Jan – Jun	Jan – Jul	Jan – Ago	Jan – Set	Jan – Out	Jan – Nov	Jan – Dez
2006	35%	26%	31%	33%	33%	36%	41%	41%	39%	40%	34%	32%
2007	20%	15%	9%	13%	14%	10%	9%	8%	5%	6%	5%	5%
2008	-10%	-3%	-12%	-7%	-10%	-9%	-10%	-11%	-10%	-11%	-12%	-13%
2009	-48%	-45%	-40%	-41%	-38%	-35%	-33%	-31%	-30%	-29%	-27%	-24%
2010	46%	43%	60%	57%	56%	51%	49%	47%	47%	46%	44%	42%



Figura VI.1 – Variações da taxa de câmbio (Real/Dólar) entre 01/01/2006 e 09/09/2013 (yahoo finanças, 2013).

A crise também teve consequências ao nível do mercado interno. Num quadro de pressão da oferta, a procura centra-se mais no preço do que na qualidade, o que prejudica a colocação dos materiais naturais, relativamente aos produtos mais baratos (principalmente de cerâmica), levando a um aumento da importação.

Os dados mais recentes mostram que as exportações voltaram a crescer durante os últimos anos, o que parece anunciar a retoma do sector. No 1º semestre de 2013, totalizaram 147,44 milhões US\$ e 331.646,13 toneladas, representando um crescimento de 18,35% em facturação e de 23,21% em volume físico, comparativamente a 2012, (ABIROCHAS – Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais; Figura VI.2).

Note-se, contudo, que a taxa de câmbio real/dólar se situava em torno de 0,44 em Setembro de 2013, significando que a competitividade do sector, em termos de exportações, se mantém em baixa (Banco Central do Brasil). Apesar disso, os índices de confiança da população e da indústria estão a evoluir positivamente (Fig. V.4),

contrariando a tendência de perda de competitividade e reforçando as projecções de subida de exportações (Figura VI.3 A e B).

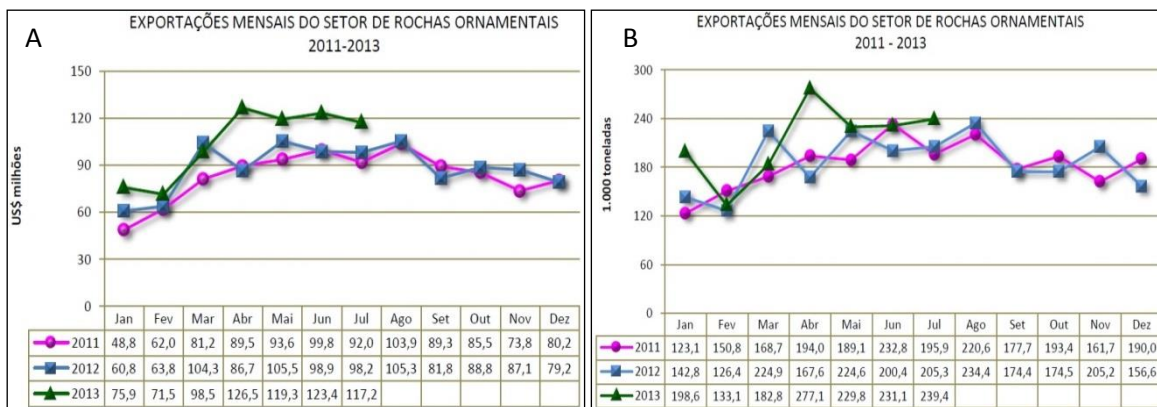


Figura VI.2 – Variação mensal das exportações de rochas ornamentais entre 2011 e 2013: (A) em milhões de dólares; (B) em mil toneladas.

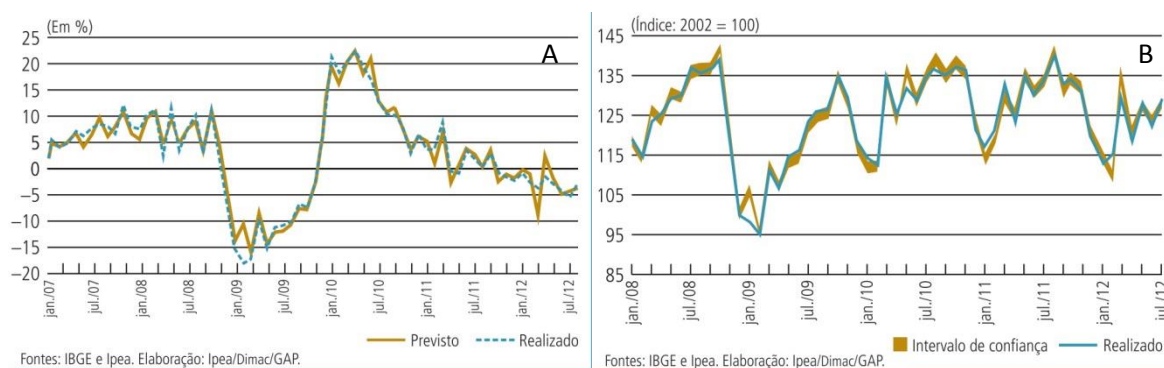


Figura VI.3 – Índices de confiança sobre o estado do sector industrial: (A) percentagem; (B) 2002=100.

O Brasil extrai os seus vastos recursos naturais, mas a sua capacidade de transformação de produtos tem que ser ampliada para impedir que a economia brasileira perca terreno nos mercados internacionais. Deverá também melhorar as transacções comerciais com os EUA e a Europa; procurar novos mercados de exportação, nomeadamente na Ásia e na América do Sul; divulgar os seus produtos e otimizar a distribuição das suas exportações.

VI.2 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

Nesta secção, apresentam-se as principais características petrográficas e físico-mecânicas das três amostras estudadas e avaliam-se as potencialidades de cada um dos litótipos para exploração como rochas ornamentais.

VI.2.1 Caracterização Petrográfica

O granito de Banabuiú é uma rocha com textura inequigranular, hipidiomórfica, de grão médio, composta por feldspato potássico, quartzo, plagioclase e proporções equivalentes de moscovite e biotite (mostrando alguns indícios de cloritização). A apatite e o zircão estão presentes como fases acessórias.

Embora não tenham sido feitas análises modais desta rocha, apresenta-se na Tabela VI.2 uma estimativa muito grosseira das proporções dos seus principais constituintes minerais. O quartzo ocorre em cristais anédricos, com dimensões variando entre 0,10 mm e 3 mm. Também pode constituir inclusões arredondadas no interior dos cristais de feldspato potássico e de plagioclase. Os grãos de feldspato potássico são anédricos e intersticiais (0,25 - 3 mm) e apresentam a macla axadrezada típica da microclina. A plagioclase está, por vezes, sericitizada e microfissurada. Apresenta a macla da albite e zonamento óptico muito mal marcado. A biotite e a moscovite têm hábito subédrico e encontram-se dispersas na matriz da rocha.

A amostra do quartzo-monzonito de Quixadá exibe uma textura hipidiomórfica, seriada, de granularidade grosseira, com indícios de deformação no estado sólido. Mineralogicamente, a rocha é constituída essencialmente por plagioclase e anfíbola (hornblenda) e menores proporções de feldspato alcalino, biotite e quartzo (Tabela VI.2). Os minerais acessórios mais comuns são: esfena, epídoto, apatite e minerais opacos. Os cristais de plagioclase e anfíbola são predominantemente subédricos e têm dimensões variadas, atingindo tamanhos máximos de 12 mm. A biotite é abundante, ocorrendo em cristais subidiomórficos cujas dimensões não excedem 2 mm. Os espaços entre os cristais de plagioclase, anfíbola e biotite estão preenchidos por uma matriz de granularidade fina (0,05 a 0,5 mm) composta maioritariamente por quartzo e feldspato potássico xenomórficos. A matriz é claramente subordinada relativamente aos restantes constituintes minerais da rocha e evidencia um acentuado grau de recristalização dinâmica. Embora esporadicamente, o feldspato potássico (microclina pertítica) pode estar presente na geração fenocristalina.

A amostra da fácies Serra Branca foi colhida num afloramento localizado na proximidade da Zona de Cisalhamento dextra de Quixeramobim (ZCQ), o que explica a presença de um *fabric* tectónico nesta rocha. Corresponde a um monzogranito porfiróide de grão grosseiro, com uma textura hipidiomórfica seriada e apresenta uma paragénese mineral contendo plagioclase, quartzo, feldspato alcalino, biotite, anfíbola, esfena, epídoto, apatite, e minerais opacos (Tabela VI.2). Os fenocristais são de feldspato potássico e de plagioclase, têm dimensões até 12,5 mm e estão frequentemente

envolvidos por bordos da recristalização. A biotite e a anfíbola (hornblenda verde) ocorrem em proporções sensivelmente idênticas, perfazendo, no conjunto, cerca de 25% do seu volume. A foliação da rocha é definida pela orientação preferencial destas duas fases minerais. O quartzo, e em menor escala, a plagioclase e o feldspato alcalino da matriz mostram indícios claros de recristalização dinâmica.

Tabela VI.2 – Tabela resumindo as características petrográficas das amostras.

Parâmetros		Granito Banabuiú	Fácies Quixadá	Fácies Serra Branca
Índice de Cor (IUGS – Streckeisen 1967)		Leucocrata	Mesocrata	Mesocrata
Estrutura		-	Fluxo Magmático	Fluxo Magmático
Textura		Hipidiomórfica inequigranular isotrópica	Hipidiomórfica inequigranular foliada	Hipidiomórfica porfiroide foliada
Granulometria		Média a fina até média (1 – 7 mm)	Média até grossa (3 – 10 mm)	Média até grossa (3 – 10 mm)
Minerais máficos (%)		10	35	25
Mineralogia Primária	% Feldspato alcalino (Afs)	35	15	20
	Grau de Alteração	Muito incipiente (5-10%)	Muito incipiente (5-10%)	Muito incipiente (5-10%)
	Contactos	Plano-serrilhado; Irregular-serrilhado; Plano-lobular	Irregular-serrilhado; Plano-serrilhado; Côncavo-serrilhado; Plano-lobular	Plano-lobular; Irregular-serrilhado; Denteado
	% Quartzo (Qtz)	30	15	25
	Grau de Alteração	Ausente (<5%)	Ausente (<5%)	Ausente (<5%)
	Contactos	Côncavo-convexo; Côncavo-serrilhado; Plano-lobular	Côncavo-serrilhado; Côncavo-convexo; Plano-lobular	Côncavo-serrilhado; Plano-lobular; Denteado
	% Plagioclase (Pl)	25	35	30
	Grau de Alteração	Incipiente (10 – 30%)	Incipiente (10 – 30%)	Incipiente (10 – 30%)
	Contactos	Irregular-serrilhado; Plano-serrilhado; Plano-lobular	Plano-serrilhado; Irregular-serrilhado	Plano-lobular; Côncavo-serrilhado
	% Biotite (Bt)	5	15	15
	Grau de Alteração	Incipiente (10 – 30%)	Muito incipiente (5 -10%)	Muito incipiente (5 -10%)
	Contactos	Plano-serrilhado; Plano-lobular	Plano-serrilhado; Plano-lobular	Plano-lobular; Plano-serrilhado
	% Anfíbola (Amp)	0	20	10
	Grau de Alteração	-	Muito incipiente (5 -10%)	Muito incipiente (5 -10%)
	Contactos	-	Plano-serrilhado; Irregular-serrilhado	Plano-serrilhado; Irregular-serrilhado
	% Moscovite (Ms)	5	0	0
	Grau de Alteração	Muito incipiente (5 -10%)	-	-
	Contactos	Plano-serrilhado; Plano-lobular	-	-
Minerais Acessórios		Apatite, zircão, minerais opacos (< 1%)	Esfena, epídoto, apatite, minerais opacos (<1%)	Esfena, epídoto, apatite, minerais opacos (<1%)
Classificação		Monzogranito	Quartzo-Monzonito	Monzogranito
Microfissuras/mm ²		4,47	5,26	3,42
Intragrão (%)		4,22	3,97	2,93
Intergrão (%)		0,25	1,29	0,49

Nas três amostras estudadas, observa-se um predomínio de microfissuras intragranulares. No granito de Banabuiú, o quartzo é o mineral que revela maior grau de microfissuramento, seguido pelo feldspato potássico e pela plagioclase. As microfissuras não mostram uma orientação preferencial e poderão estar relacionadas com a intrusão do granito ou ter-se formado numa fase frágil mais tardia.

Em contraste, nas amostras das fácies Quixadá e Serra Branca, a anfíbola contribui de modo significativo para o elevado índice de microfissuramento registado, pois os grãos de quartzo e feldspato dos domínios recristalizados estão muito pouco fracturados. É de referir ainda que, na fácies Quixadá e Serra Branca, as microfissuras da anfíbola tendem a orientar-se na perpendicular à direcção da foliação, podendo corresponder a micro-fendas de tracção geradas durante o cisalhamento dúctil que afectou estes litótipos. O facto do quartzo e feldspato estarem a sofrer recristalização dinâmica durante a deformação poderia explicar a fraca expressão das microfissuras nos agregados granoblásticos presentes na matriz desta rocha. As microfissuras dos três granitóides têm, em geral, uma baixa comunicabilidade entre si, encontrando-se, nalguns casos, preenchidas por minerais opacos.

Os indícios de alteração nas três amostras estudadas não são muito intensos, sendo mais evidentes no granito de Banabuiú. Afectam essencialmente a plagioclase (sericitização ligeira) e a biotite que está, por vezes, parcialmente substituída por clorite.

VI.2.2 Caracterização Físico-Mecânica

A avaliação da qualidade de uma rocha para exploração como pedra natural baseia-se em padrões estéticos e na determinação de um vasto conjunto de propriedades físico-químicas e mineralógicas (Vidal *et al.*, 2005). Apresentam-se em seguida os resultados dos ensaios de caracterização físico-mecânica obtidos nesta investigação.

VI.2.2.1 Índices Físicos

Os valores da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água das amostras dos granitóides de Serra Branca, Quixadá e Banabuiú estão compilados na Tabela VI.3 e projectados nos gráficos das Figuras VI.4, VI.5 e VI.6, onde se representaram também os seus respectivos índices de microfissuramento (Tabela VI.2). A comparação dos dados obtidos com os valores recomendados por Frazão & Farjallat (1995) e pela norma ASTM C-615 (1992) demonstram que as três rochas

cumprem os requisitos para serem exploradas como rochas ornamentais e de revestimento (Tabela VI.3; Figs. VI.4, VI.5 e VI.6).

Tabela VI.3 – Valores médios da massa específica aparente, porosidade aparente e absorção de água nos três granitóides estudados. Na última coluna indicam-se os valores recomendados por Frazão & Farjallat (1995) e pela norma ASTM C-615 (1992).

Resultados Ensaio		Materiais Estudados			Valores Recomendados	
		Serra Branca	Quixadá	Banabuiú	ASTM C-615	Frazão & Farjallat
Classificação Petrográfica		Monzogranito porfiróide	Quartzo-Monzonito	Granito duas micas	-	-
Massa Específica Aparente (g/cm ³)	Seca	2,701	2,774	2,617	≥ 2,560	≥ 2,550
	Saturada	2,704	2,779	2,625		
Porosidade Aparente (%)		0,349	0,552	0,810	n.e.*	≤ 1,0
Absorção de Água (%)		0,129	0,199	0,310	≤ 0,4	≤ 0,4

*n.e. – não especificado.

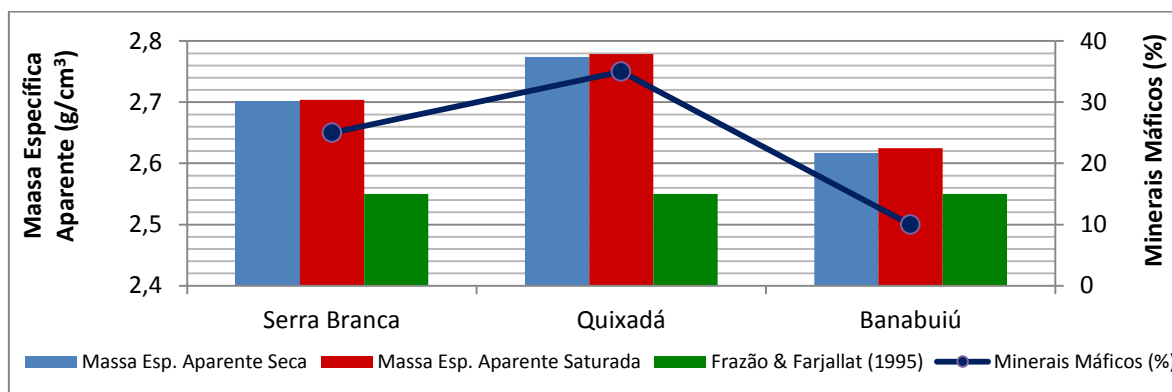


Figura VI.4 – Valores médios da massa específica aparente, seca e saturada, expressos em g/cm³, nos três granitóides. Para efeitos de comparação, projectaram-se também os valores recomendados por Frazão & Farjallat (1995) e os dados dos índices de máficos obtidos na análise petrográfica.

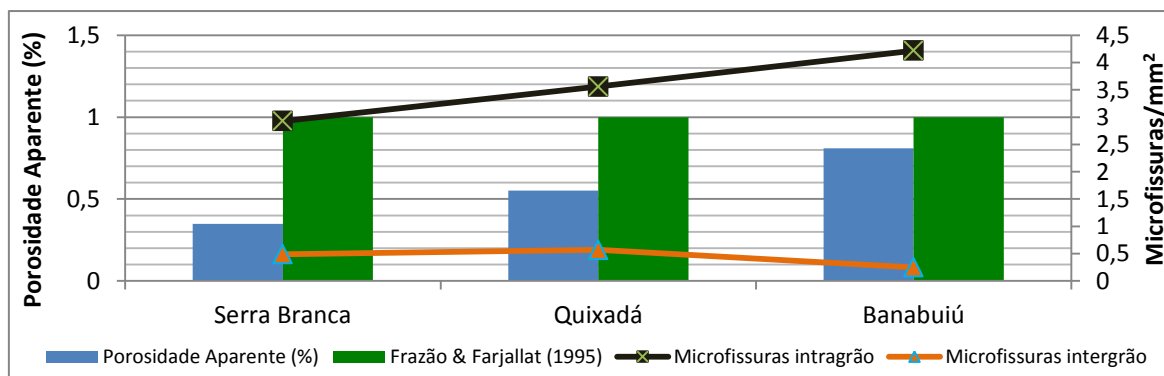


Figura VI.5 – Valores médios da porosidade aparente (%) dos três granitóides. Para efeitos de comparação, projectaram-se também os valores recomendados por Frazão & Farjallat (1995) e os dados dos índices de microfissuramento obtidos na análise petrográfica.

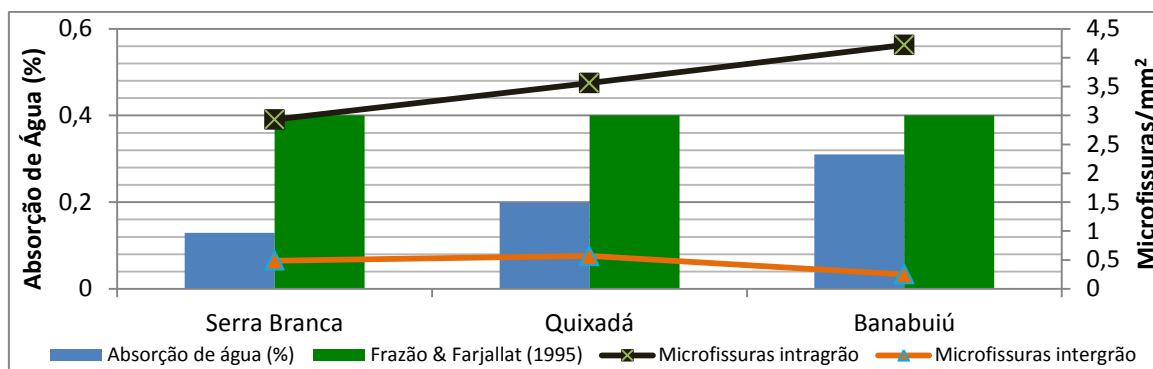


Figura VI.6 – Valores médios da absorção de água (%) nos três granitóides em estudo. Para efeitos de comparação, projectaram-se também os valores recomendados por Frazão & Farjallat (1995) e os dados dos índices de microfissuramento obtidos na análise petrográfica.

Os valores da massa específica aparente nas amostras do quartzo monzonito de Quixadá e do monzogranito porfiróide de Serra Branca são significativamente superiores aos do granito de duas micas de Banabuiú, reflectindo o seu maior conteúdo em minerais máficos, cujas massas específicas são mais elevadas do que as do quartzo e dos feldspatos (biotite: 2.7-3.3 g/cm³; hornblenda: 3.02-3.45 g/cm³). Por outro lado, verifica-se que os dados de porosidade aparente e de absorção de água nas três amostras parecem definir uma correlação positiva com o índice de microfissuramento, sugerindo que o comportamento destes dois parâmetros foi controlado essencialmente pelo número de microfissuras presentes nas rochas. Embora o estado de alteração dos maciços rochosos possa contribuir para aumentar a sua porosidade aparente e a sua capacidade de absorção de água, a influência deste factor terá sido, neste caso, muito reduzida, devido ao fraco grau de alteração observado nos constituintes minerais das três amostras estudadas (Tabela VI.2).

VI.2.2.2 Resistência à Compressão Uniaxial Simples

Os resultados dos ensaios de compressão uniaxial simples realizados sobre provetes cúbicos das amostras dos granitóides de Serra Branca, Quixadá e Banabuiú estão sintetizados na Tabela VI.4 e representados graficamente na Figura VI.7.

Os valores médios da resistência à compressão uniaxial (σ_c) variam de 108 a 144 MPa, satisfazendo nos três casos, as condições requeridas para a sua utilização como pedra natural ($\sigma_c \geq 100$ MPa). As três rochas classificam-se como muito resistentes segundo as normas ISRM (1977).

As diferenças de resposta mecânica entre as três rochas analisadas mostram que o monzogranito porfiróide de Serra Branca é a fácies mais resistente, seguido pelo granito de duas micas de Banabuiú e pelo quartzo-monzonito de Quixadá.

Tabela VI.4 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão uniaxial simples para os três granitóides estudados. Na última coluna indicam-se os valores recomendados por Frazão & Farjallat (1995) e pela norma ASTM C-615 (1992).

Resultados Ensaio			Materiais Estudados			Valores Recomendados	
			Serra Branca	Quixadá	Banabuiú	ASTM C-615	Frazão & Farjallat
Resist. uniaxial simples (MPa)	compressão Normal		144,0 MPa	115,7 MPa	116,2 MPa	≥ 131,0	≥ 100,0
	Paralela		122,9 MPa	108,5 MPa			

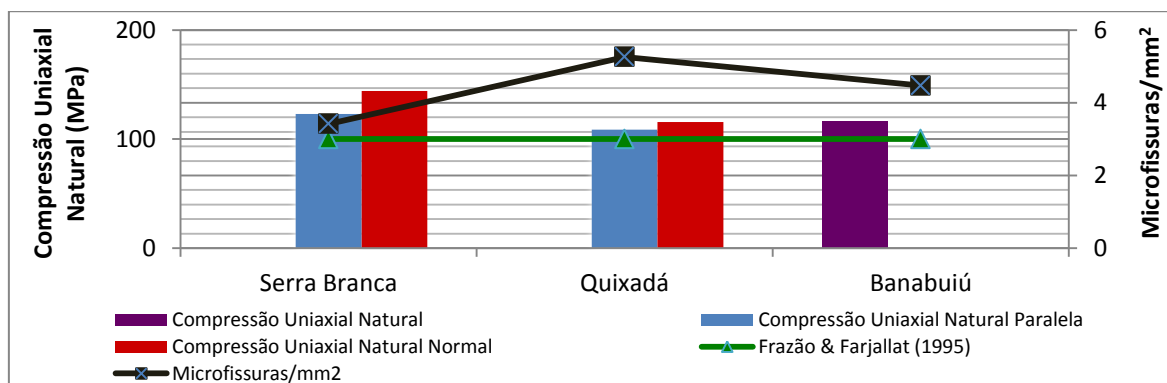


Figura VI.7 – Resultados dos ensaios de compressão uniaxial simples (MPa) para os três granitóides em estudo. Para efeitos de comparação, projectaram-se também os valores recomendados por Frazão & Farjallat (1995) e os dados de microfissuras.

Considerando que os planos de anisotropia representam superfícies de maior fraqueza da rocha, seria expectável que o granito de duas micas de Banabuiú apresentasse os valores mais altos de σ_c , pois é o único com textura isotrópica (Tabela VI.2). A sua menor resistência à deformação comparativamente ao monzogranito porfiróide de Serra Branca poderá estar relacionada com o facto do granito de Banabuiú possuir um grau de microfissuramento superior e, conseqüentemente, uma porosidade aparente também mais alta (Fig. VI.7). Em contrapartida, o comportamento do quartzo-monzonito de Quixadá está de acordo com o esperado, na medida em que a presença de uma foliação bem marcada nesta rocha terá seguramente contribuído para os menores valores de σ_c observados.

Tanto o monzogranito porfiróide de Serra Branca como o quartzo-monzonito de Quixadá exibem uma clara anisotropia de resistência para o comportamento frágil, caracterizada por variações significativas nos valores de σ_c , consoante a direcção da carga aplicada (Tabela VI.4). Em ambos os casos, os menores valores de σ_c ocorrem na direcção paralela à foliação. De uma forma geral, os valores da resistência à ruptura tendem a ser mais altos quando a carga é aplicada perpendicularmente aos planos de descontinuidade estrutural e, nesse sentido, a resposta mecânica dos dois granitóides está de acordo com o esperado.

VI.2.2.3 Resistência à Flexão em Três Pontos

Os valores médios obtidos no ensaio de resistência à flexão nas amostras dos três granitóides são apresentados na Tabela VI.5 e na Figura VI.8. Das três rochas estudadas, apenas a fácies Serra Branca cumpre os requisitos propostos por Frazão & Farjallat (1995) para exploração como rocha ornamental (≥ 10 MPa). Nas outras duas amostras, os valores de resistência à flexão estão próximos do limite recomendado, mas não chegam a atingi-lo.

Na Figura VI.8, é possível verificar ainda que a resistência a esforços flectores nas três amostras define uma correlação positiva com a porosidade aparente que, por sua vez, está directamente relacionada com o índice de microfissuramento (Fig. VI.5). A quantidade de vazios (poros e fissuras) parece exercer, assim, uma influência determinante na resistência à ruptura destas rochas.

Devido à presença de uma foliação nos granitóides de Quixadá e de Serra Branca, os ensaios de resistência à flexão foram realizados perpendicularmente e paralelamente aos planos de foliação. Nestes ensaios, a fácies Quixadá não revela diferenças de resistência com a mudança de direcção da carga pontual aplicada, enquanto a fácies Serra Branca, concordando com os valores de compressão uniaxial simples, apresenta valores mais elevados na direcção normal aos planos de foliação.

Tabela VI.5 – Resultados dos ensaios de resistência à flexão para os três granitóides estudados. Na última coluna indicam-se os valores recomendados por Frazão & Farjallat (1995) e pela norma ASTM C-615 (1992).

Ensaio \ Resultados		Materiais Estudados			Valores Recomendados	
		Serra Branca	Quixadá	Banabuiú	ASTM C-615	Frazão & Farjallat
Flexão em 3 Pontos (MPa)	Normal	17,7	9,60	7,47	$\geq 10,34$	≥ 10
	Paralela	11,1	9,61			

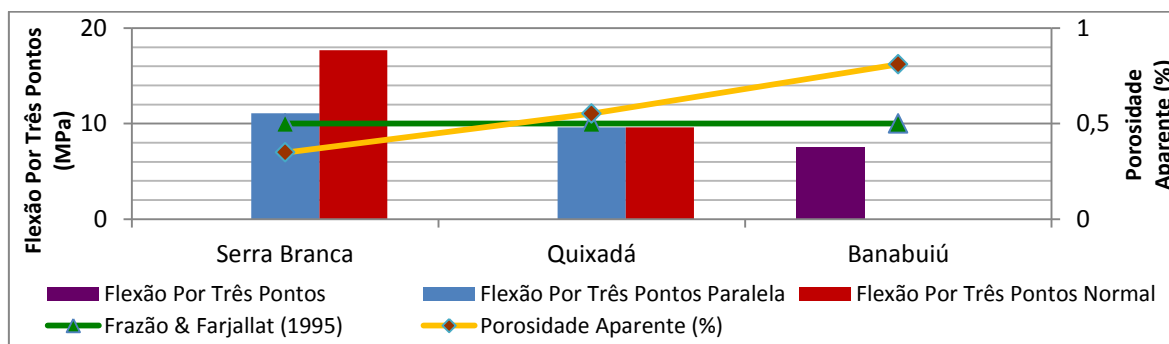


Figura VI.8 – Resultados dos ensaios de flexão em três pontos (MPa) para os granitóides estudados. Para efeitos de comparação, projectaram-se também os valores recomendados por Frazão & Farjallat (1995) e os dados da porosidade aparente.

VI.2.2.4 Desgaste por Abrasão Amsler

Os resultados dos ensaios de desgaste abrasivo mostram que as amostras do monzogranito de Serra Branca e do granito de Banabuiú preenchem ambas os critérios técnicos de qualidade ornamental (Tabela VI.6, Fig. VI.9). Já no caso do quartzo-monzonito de Quixadá, os valores obtidos são ligeiramente superiores aos recomendados por Frazão & Farjallat em 1995 (≤ 1 mm) (Tabela VI.6, Fig. VI.9).

Tendo em conta que a resistência de uma rocha de desgaste abrasivo depende da sua mineralogia, em particular da dureza e da vulnerabilidade à alteração dos seus principais constituintes minerais, é compreensível que a amostra da fácies Quixadá seja aquela em que se registaram valores mais elevados para este parâmetro. Com efeito, o seu baixo conteúdo em quartzo ($\approx 15\%$), que é um mineral com dureza elevada, explica a menor resistência desta rocha ao desgaste abrasivo. Por outro lado, o facto do quartzo-monzonito de Quixadá conter teores altos em minerais pouco resistentes à alteração (anfíbola: $\approx 20\%$; biotite: $\approx 15\%$) é outro dos factores que poderá ter contribuído para os baixos valores observados (Fig. VI.9).

Tabela VI.6 – Resultados dos ensaios de desgaste por abrasão Amsler para os granitóides estudados. Indicam-se também os valores recomendados por Frazão & Farjallat (1995) e pela norma ASTM C-615 (1992).

Resultados			Materiais Estudados			Valores Recomendados	
			Serra Branca	Quixadá	Banabuiú	ASTM C-615	Frazão & Farjallat
Desgaste Abrasivo por 1000 m (mm)	Normal		0,814	1,248	0,888	n.e.*	$\leq 1,0$
	Paralela		0,896	1,105			

*n.e. – não especificado

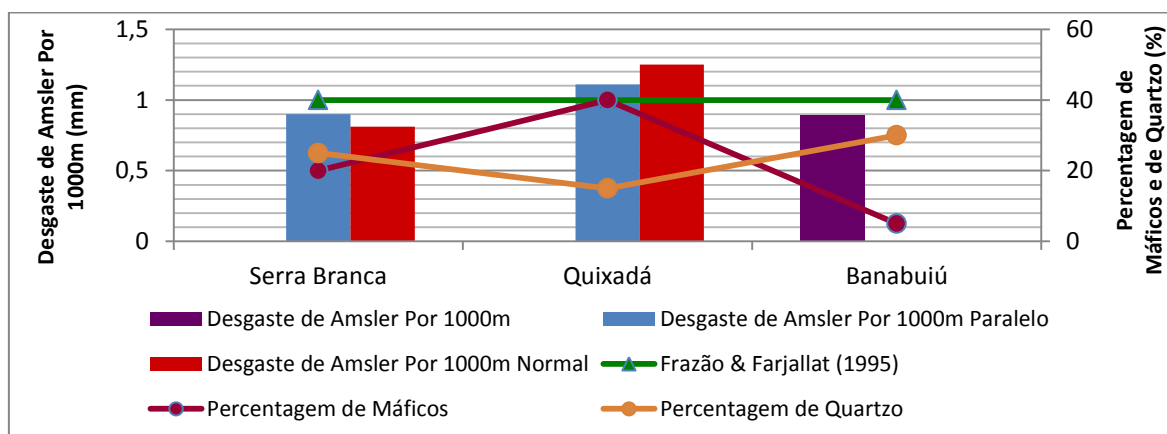


Figura VI.9 – Resultados do ensaio de desgaste por abrasão de Amsler (mm) para os granitóides estudados. Para efeitos de comparação, projectaram-se também os valores recomendados por Frazão & Farjallat (1995) e as estimativas das percentagens de minerais máficos e de quartzo.

A maior resistência ao desgaste dos granitóides de Serra Branca e de Banabuiú parece ser essencialmente devida à abundância de quartzo, já que as proporções de minerais máficos nestes litótipos são muito diferentes (Fig. VI.9).

VI.2.2.5 Velocidade de Propagação de Ondas Ultra-Sónicas (m/s)

Teoricamente, as velocidades das ondas que atravessam os provetes de rocha dependem exclusivamente das suas características elásticas e da sua massa específica. Contudo, na prática, prova-se que a rede de fissuras também influencia os resultados, fazendo diminuir o valor das velocidades.

Como se pode observar na Tabela VI.7 e nas Figuras VI.10 e VI.11, a amostra da fácies Serra Branca é a única que cumpre os requisitos estipulados por Frazão & Farjallat (1995) em todos os ensaios realizados para a velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas, o que parece estar directamente relacionado com a sua elevada massa específica aparente e os seus baixos índices de microfissuramento e de porosidade aparente.

Por outro lado, é no granito de Banabuiú que se registam os valores mínimos de velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas, reflectindo a menor massa específica aparente desta rocha, bem como o seu maior índice de porosidade aparente. As amostras da fácies Quixadá têm um comportamento intermédio entre as outras duas, apesar da sua massa específica aparente ser ligeiramente superior à do monzogranito de Serra Branca (Tabela VI.3). É provável, por isso, que a presença de uma quantidade significativa de vazios (poros e fissuras) nesta rocha tenha contribuído para a diminuição da velocidades de propagação das ondas ultra-sónicas.

Tabela VI.7 – Velocidades de propagação de ondas ultra-sónicas (m/s) nos granitóides estudados. Indicam-se também os valores recomendados por Frazão & Farjallat (1995) e pela norma ASTM C-615 (1992).

Resultados Ensaio		Materiais Estudados			Valores Recomendados	
		Serra Branca	Quixadá	Banabuiú	ASTM C-615	Frazão & Farjallat
Velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas em provetes para Compressão Uniaxial (m/s)	Normal	5132	3633	3536	n.e. *	≥ 4000
	Paralela	5363	4121			
Velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas em provetes para Flexão em 3 Pontos (m/s)	Normal	4919	3728	3284	n.e.*	≥ 4000
	Paralela	5152	4087			

* n.e. – não especificado

Os granitóides de Serra Branca e de Quixadá exibem ambos uma variação nítida na velocidade de propagação das ondas ultra-sónicas com a direcção, como consequência da orientação preferencial dos seus constituintes minerais (Tabela VI.7; Figs. VI.10 e VI.11). Nos provetes para ensaios de compressão uniaxial e de resistência à flexão por três pontos, as amostras das duas unidades comportam-se de acordo com o esperado, apresentando velocidades de propagação mais altas na direcção paralela à foliação. Nos provetes usados para o ensaio de resistência à flexão por três pontos, registam-se, em geral, velocidades de propagação das ondas ultra-sónicas inferiores.

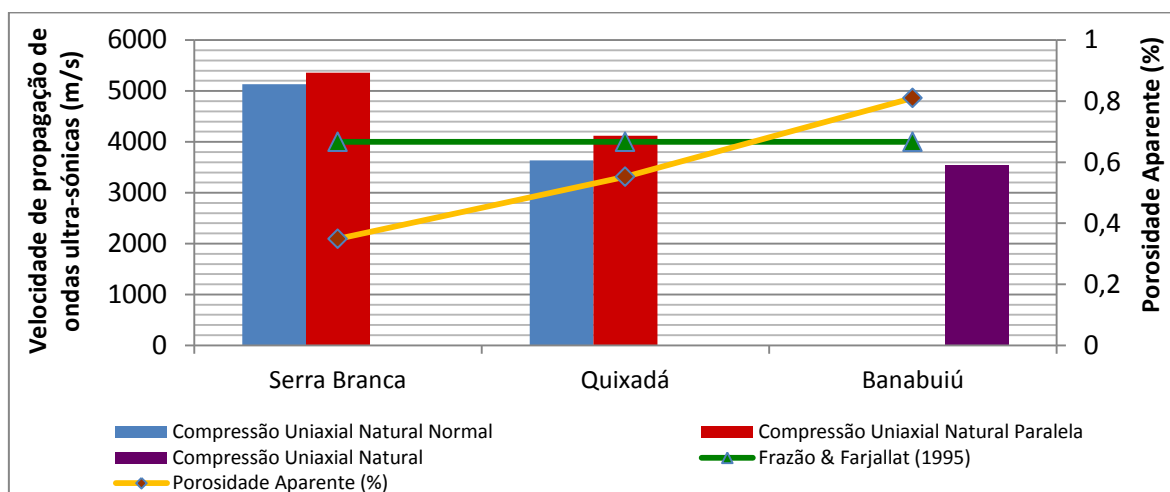


Figura VI.10 – Valores médios da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas (m/s) nos provetes para ensaio de compressão uniaxial dos três granitóides estudados. Para efeitos de comparação, projectaram-se também os valores recomendados por Frazão & Farjallat (1995) e os dados da porosidade aparente.

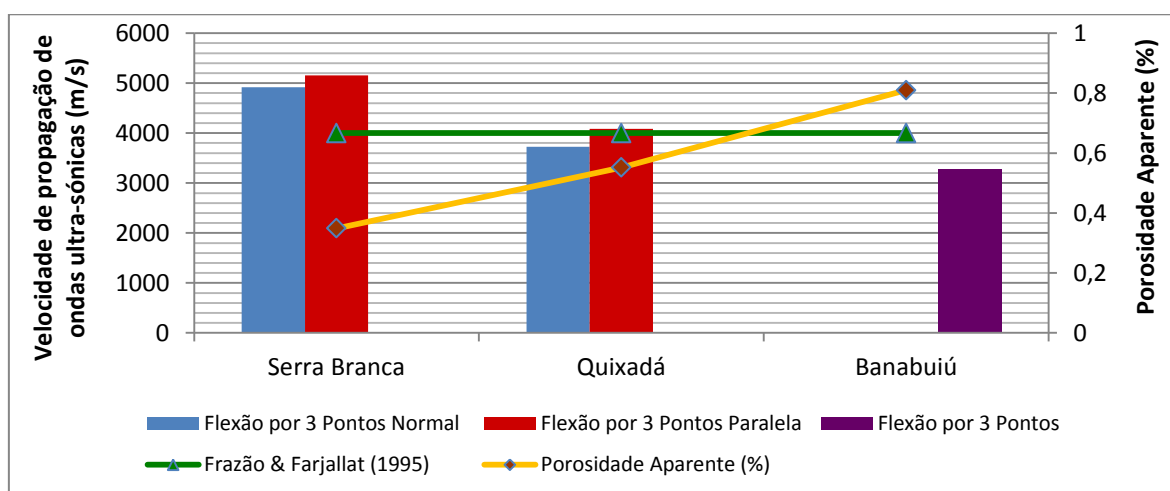


Figura VI.11 – Valores médios da velocidade de propagação de ondas ultra-sónicas (m/s) nos provetes para ensaio de resistência à flexão dos três granitóides estudados. Para efeitos de comparação, projectaram-se também os valores recomendados por Frazão & Farjallat (1995) e os dados da porosidade aparente.

VI.3 CARACTERIZAÇÃO RADIOMÉTRICA

Para efeitos de caracterização radiométrica, foram realizados ensaios de espectrometria de raios gama e de exalação de radão no Laboratório de Radioatividade Natural do Departamento de Ciências da Terra da Universidade de Coimbra (LRN-DCTUC), usando a metodologia descrita no Capítulo V. Os dados obtidos são apresentados nas Tabelas VI.8 e VI.9 e representados graficamente nas Figuras VI.12, VI.13 e VI.14.

VI.3.1 Espectrometria de Raios Gama

Na Tabela VI.8 estão compilados os valores obtidos nos ensaios de espectrometria de raios gama para quatro amostras do granito de Banabuiú, quatro amostras da fácies Serra Branca e quatro amostras da fácies Quixadá. As concentrações de urânio e tório estão expressas em ppm e as de potássio em percentagem. A tabela inclui ainda as medições da actividade de U, Th e K (Bq/Kg), os valores calculados para a actividade de rádio equivalente (Ra_{eq}), o índice de risco de radiação externa (H_{ext}) e o índice de concentração da actividade gama (I).

Tabela VI.8 – Resultados dos ensaios de espectrometria de raios gama.

Amostra	U (ppm)	Th (ppm)	K ₂ O (%)	C _U (Bq/Kg)	C _{Th} (Bq/Kg)	C _K (Bq/Kg)	Ra _{eq} (Bq/Kg)	H _{ext}	I	Observações
Ra 1	0,03	7,7	3,91	0,4	31,5	1013,9	123,5	0,33	0,50	Fácies Serra Branca
Ra 2	1,31	7,8	2,93	16,1	31,7	759,1	119,9	0,32	0,47	
Ra 3	0,27	7,7	3,51	3,4	31,4	910,8	118,4	0,32	0,47	
Ra 4	0,77	7,1	3,21	9,5	28,9	832,4	114,9	0,31	0,45	
Ra 5	0,70	29,7	5,32	8,6	120,5	1378,5	287,1	0,77	1,09	Granito Banabuiú
Ra 6	1,22	29,0	5,27	15,1	117,7	1365,7	288,6	0,78	1,09	
Ra 7	1,81	30,9	5,31	22,4	125,6	1376,8	308,0	0,83	1,16	
Ra 8	1,38	30,0	5,50	17,0	122,0	1426,3	301,3	0,81	1,14	
Ra 9	0,77	3,5	2,64	9,6	14,4	684,0	82,9	0,22	0,33	Fácies Quixadá
Ra 10	0,37	3,3	3,44	4,6	13,3	891,2	92,2	0,25	0,38	
Ra 11	0,93	3,7	2,97	11,5	15,2	769,7	92,5	0,25	0,37	
Ra 12	1,32	3,0	3,88	16,3	12,2	1006,8	111,3	0,30	0,45	

Em termos composicionais, verifica-se que o granito de Banabuiú se distingue dos outros dois granitóides pelo seu nítido enriquecimento em U, Th e K₂O, o que está de acordo com a maior abundância de fases ricas em potássio (feldspato potássico e micas) bem como de minerais acessórios portadores de U e Th (zircão, monazite) neste litótipo.

Qualquer dos granitóides estudados apresenta valores de actividade de rádio equivalente (Ra_{eq}) e índices de risco de radiação externa (H_{ext}) dentro dos limites estabelecidos pelas normas em vigor ($Ra_{eq} < 370$ Bq/kg e $H_{ext} < 1$), o que permite classificá-los como pouco radioactivos e demonstra que podem ser usados na construção civil, sem risco de exposição externa. Deve ter-se em atenção, contudo, que os valores encontrados para os dois parâmetros nas amostras do granito Banabuiú estão próximos do teor de corte (Fig. VI.12).

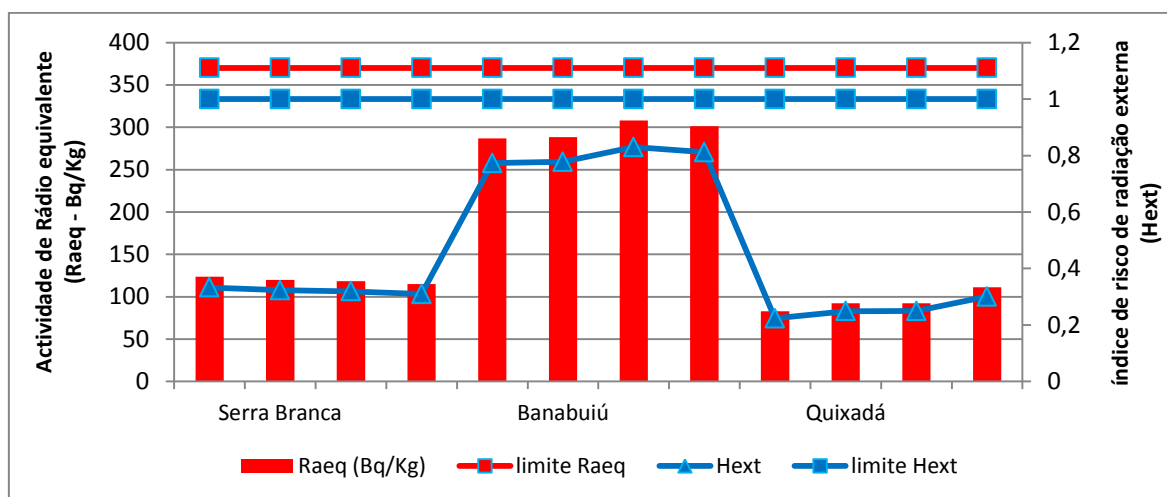


Figura VI.12 – Resultados dos ensaios de espectrometria de raios gama. A vermelho, representa-se a actividade de rádio equivalente (Bq/Kg) e a azul, o índice de risco de radiação externa. Para efeitos de comparação, projectaram-se também os valores limite para cada parâmetro (linhas rectas do gráfico).

No que diz respeito ao índice de concentração da actividade gama (I), todas as rochas estudadas apresentam valores de $I \leq 6$, o que significa que a sua dose efectiva anual é inferior ao limite recomendado (Tabela VI.8). Segundo Unscear (1993), os materiais com valores de $I \geq 6$ devem ser evitados, pois podem provocar uma elevação da taxa de dose anual acima do aceitável (1 mSv/a). No caso das amostras das fácies Serra Branca e Quixadá, os valores do índice de concentração da actividade gama são claramente inferiores a 1, pelo que poderão ser usadas na construção civil sem quaisquer restrições (e.g. placas de revestimento). Já a utilização das amostras do granito Banabuiú ($I \geq 1$) na construção tem mais limitações, sendo aconselhada para a produção de peças em que não sejam requeridas grandes quantidades de material (e.g. lareiras).

VI.3.2 Exalação de Radão

Os resultados de concentração da exalação de radão dentro do contentor (actividade específica) estão sumarizados na Tabela VI.9. Na mesma tabela, indicam-se

os valores calculados de fluxo. Durante o período de análise, a temperatura variou de 16°C a 19°C, a pressão de 988 a 989 mbar e a humidade relativa de 71% rH a 63% rH.

Tabela VI.9 – Resultados dos ensaios da concentração da exalação do radão.

Amostra	Tempo		Valor (Bq/m³)	Background (Bq/m³)	Fluxo (Bq/m²/h)	Observações		
	Início	Fim						
Ra 1	(10h58)	(10h13)	111	176	< LD*	Fácies Serra Branca		
	(11h04)	(11h19)						
Ra 2	(11h21)	(11h36)	252	47	0,241		Fácies Serra Branca	
	(11h27)	(11h42)						
Ra 3	(11h44)	(11h59)	197	110	0,102			Fácies Serra Branca
	(11h50)	(12h05)						
Ra 4	(12h06)	(12h21)	99	156	< LD*	Fácies Serra Branca		
	(12h12)	(12h27)						
Ra 5	(12h30)	(12h45)	398	70	0,385		Granito Banabuiú	
	(12h36)	(12h51)						
Ra 6	(12h53)	(13h08)	622	151	0,553			Granito Banabuiú
	(12h59)	(13h14)						
Ra 7	(13h18)	(13h33)	412	155	0,302	Granito Banabuiú		
	(13h24)	(13h39)						
Ra 8	(13h40)	(13h55)	643	132	0,600		Granito Banabuiú	
	(13h46)	(14h01)						
Ra 9	(14h03)	(14h18)	132	141	< LD*			Fácies Quixadá
	(14h09)	(14h24)						
Ra 10	(14h28)	(14h43)	74	69	0,006	Fácies Quixadá		
	(14h34)	(14h49)						
Ra 11	(14h51)	(15h06)	106	31	0,088		Fácies Quixadá	
	(14h57)	(15h12)						
Ra 12	(15h13)	(15h28)	76	21	0,065			Fácies Quixadá
	(15h19)	(15h34)						

*LD – limite de detecção

As actividades específicas mais altas foram registadas nas amostras do granito Banabuiú ($> 400 \text{ Bq/m}^3$), o que deverá estar essencialmente relacionado com os elevados teores de U nestas rochas (Tabela VI.9, Fig. VI.13). Em contrapartida, as amostras das fácies Quixadá e Serra Branca apresentam valores de actividade específica significativamente inferiores, em consonância com as suas baixas concentrações em urânio (Tabela VI.9, Fig. VI.13).

À semelhança do que acontece com os dados da actividade específica, também é o granito Banabuiú que exhibe os valores de fluxo mais elevados ($> 0,3 \text{ Bq/m}^2/\text{h}$), enquanto as amostras da fácies Quixadá mostram os valores mais baixos ($< 0,09 \text{ Bq/m}^2/\text{h}$). A variabilidade observada parece ter sido controlada, em grande parte, pelas diferenças no teor em urânio nos três granitóides (Tabela VI.9, Fig. VI.14).

No entanto, é provável que o comportamento dos três granitóides também tenha sido influenciado pela sua porosidade aparente, uma vez que a presença de vazios na rocha aumenta a libertação do radão, mas a baixa comunicabilidade entre os poros reduz

a libertação do radão. Não é de estranhar, assim, que o granito Banabuiú apresente a taxa de exalação de radão mais alta, pois além de ter os teores de U mais elevados é a rocha em que os valores de porosidade são mais elevados. Por outro lado, a fácies Quixadá possui uma taxa de exalação de radão inferior à do monzogranito de Serra Branca, embora contenha teores de urânio e valores de porosidade e microfissuramento ligeiramente superiores, o que poderá estar relacionado com o facto das amostras de Serra Branca possuírem um número superior de microfissuras e poros, com comunicabilidade entre si, por onde o ^{222}Rn pode escapar.

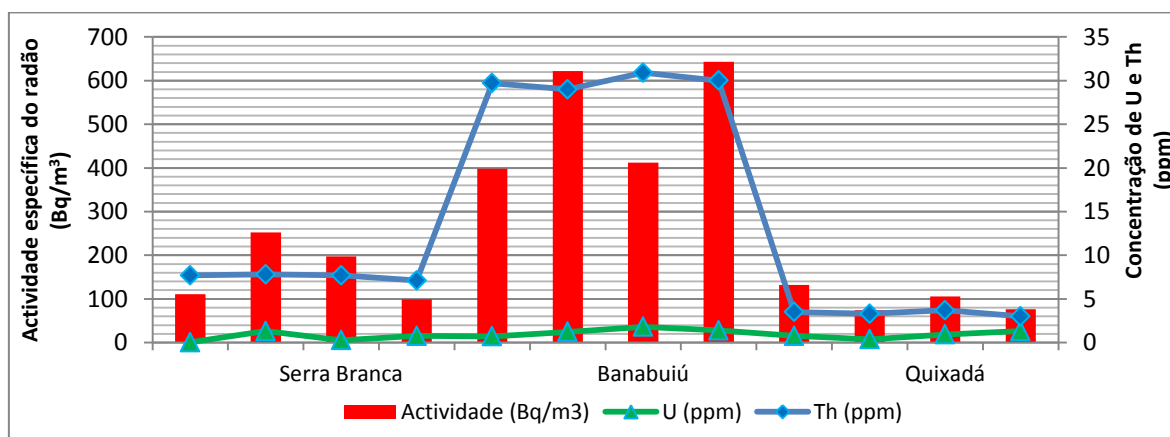


Figura VI.13 – Gráfico comparativo da actividade específica do radão (Bq/m^3) com as concentrações de U e de Th (ppm).

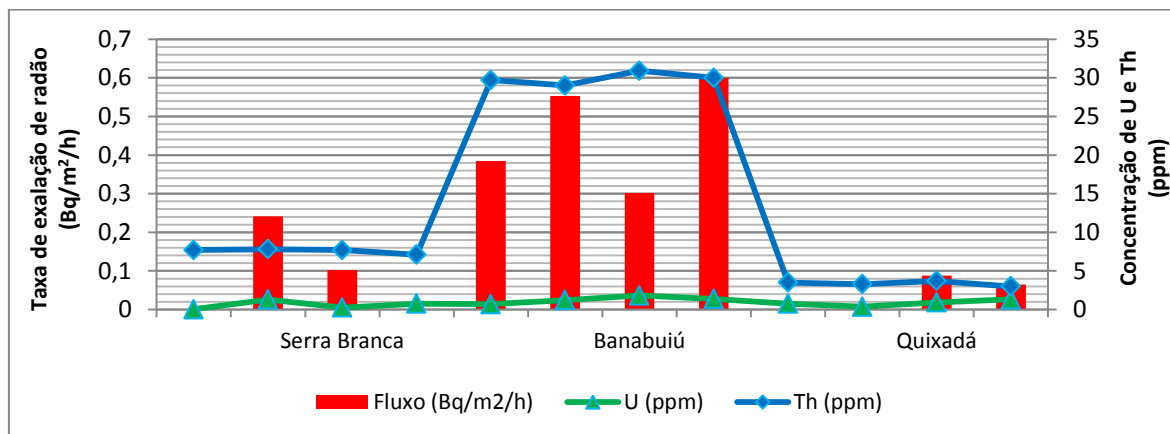


Figura VI.14 – Gráfico comparativo das concentrações de U e de Th (ppm) com a taxa de exalação de radão ($\text{Bq/m}^2/\text{h}$).

Independentemente das diferenças acima mencionadas, as taxas de exalação de radão nos três granitóides estudados são bastante baixas e não levantam reservas quanto à sua utilização como rochas ornamentais.

CAPÍTULO VII:

CONCLUSÕES

CAPÍTULO VII: CONCLUSÕES

Em jeito de conclusão, esta investigação insidiu sobre três granitóides, granito Banabuiú, fácies Serra Branca e fácies Quixadá, que pertencem a três batólitos distintos: Banabuiú, Quixeramobim e Quixadá, respectivamente. Estes três batólitos estão inseridos no Domínio Ceará Central (Ceará, Brasil), localizado na Província Borborema. Estes batólitos, segundo dados geocronológicos disponíveis apresentam uma idade Neoproterozóica e de origem associada à orogenia Brasileira (≈ 600 Ma).

Tendo em conta os dados de campo e os estudos petrográficos efectuados elaborou-se um novo mapa geológico para a área cartografada, retirando-se as seguintes conclusões:

1. A área cartografada é cortada pela zona de cisalhamento de Quixeramobim, que tem uma orientação NE-SW, situado-se a NW da mesma as rochas encaixantes, enquanto que a SE localizam-se as várias fácies do batólito de Quixeramobim.
2. As rochas encaixantes, em geral, têm uma foliação bem definida, com orientação NE-SW e mergulhos para NW, sendo divididas em duas unidades: Unidade Juatama e Unidade Quixeramobim. A Unidade Juatama situa-se imediatamente a NW da zona de cisalhamento de Quixeramobim, tendo, por isso, as foliações com os mergulhos mais intensos, e é constituída litologicamente por metatexitos e diatexitos, por vezes, intercalados com anfibolitos. A Unidade Quixeramobim faz contacto a SE com a unidade anterior, possui foliações com mergulhos menos intensos, e é formada por um conjunto de rochas metassedimentares pelíticas, contendo intercalações de quartzitos, rochas calco-silicatadas, mármore e anfibolitos. As litologias pelíticas estão representadas essencialmente por gnaisses paraderivados, por vezes, migmatizados, nos quais se podem intercalar, micaxistos. No interior da Unidade Quixeramobim foi individualizada uma formação quartzítica que, devido à sua expressão cartográfica, foi marcada separadamente no mapa apresentado.
3. A Unidade Quixeramobim pode ser interpretada como uma antiga plataforma continental que passou por vários processos de metamorfismo médio a alto grau metamórfico. As rochas da Unidade Juatama foram formadas posteriormente por fusão parcial destes metassedimentos, tendo ocorrido um acréscimo do grau de migmatização e, conseqüentemente, do grau metamórfico de NW para SE até se chegar ao Migmatito (nas proximidades da zona de cisalhamento).

4. O batólito de Quixeramobim é constituído por sete fácies, da mais antiga para a mais recente: Muxurê Velho, Água Doce, Muxurê Novo, Boa Fé, Serra Branca, Uruquê e Mobilizados Tardios. As fácies Muxurê Novo, Boa Fé e Serra Branca formam três manchas alongadas segundo o *trend* regional (NE-SW), as fácies Muxurê Velho e Água doce constituem corpos mais pequenos incluídos nas manchas principais e a fácies Uruquê e os mobilizados tardios aparecem sob a forma de diques intrusivos nas outras fácies. A composição destas rochas varia de granítica a diorítica e o tamanho relativo dos minerais varia de porfíroide, com fenocristais de feldspato até 20 cm, a equigranulares de grão fino.

Por último, o estudo da caracterização tecnológica e radiométrica da fácies Serra Branca, da fácies Quixadá e do granito Banabuiú demonstrou que:

1. Em consequência da maioria dos resultados obtidos nos ensaios tecnológicos satisfazerem os valores recomendados por Frazão & Farjallat (1995) e pela ASTM C-615 (1992), os três granitóides cumprem os requisitos necessários para a exploração como rocha ornamental.
2. Em termos de caracterização radiométrica, os três litótipos satisfazem os requisitos necessários em termos de exalações de gases (U, Th, K e Rn), podendo ser aplicados na generalidade dos materiais de construção. Contudo, o granito Banabuiú deve ter algumas restrições, sendo apenas aconselhada a sua utilização para materiais usados em menores quantidades.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

(NBR – 12.042, 1992). Materiais Inorgânicos – Determinação do Desgaste por Abrasão

(NBR – 15845, 2010). Anexo A (normativo) – Análise petrográfica – Método de ensaio

(NBR – 15845, 2010). Anexo B (normativo) – Densidade aparente, porosidade aparente e absorção de água – Método de ensaio

(NBR – 15845, 2010). Anexo E (normativo) – Resistência à compressão uniaxial – Método de ensaio

(NBR – 15845, 2010). Anexo F (normativo) – Módulo de ruptura (flexão por carregamento em três pontos) – Método de ensaio

ALMEIDA, F.F.M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B.B.; FUCK, R.A. (1981). Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth Sciences Reviews*, vol. 17, p. 1-129.

ALMEIDA, A.R. (1995). Petrologia e aspectos tectônicos do Complexo Granítico Quixadá - Quixeramobim. *Tese de Doutorado* - IG/USP, 279 fls.

ALMEIDA, A.R.; ULBRICH, H.H.G.J. (2001). O papel da mistura de magmas na gênese do magmatismo granítico cálcio-alcálico Quixeramobim-Ce. *Revista de Geologia*, v. 14, p. 49-80.

AMARAL, W.S.; NOGUEIRA NETO, J.A.; SANTOS, T.J.S.; FETTER, A.H.; ARTHAUD, M.H. (2008). Faixa Granulítica de Cariré, Domínio Ceará Central: Idades Modelo Sm-Nd e Lu-Hf, U-Pb (zircões) e Contexto Geológico. *44º Congresso Brasileiro de Geologia, Curitiba*. Anais do 44º Congresso Brasileiro de Geologia, p. 17.

AMARAL, W.S.; SANTOS, T.J.S.; WERNICK, E.; NOGUEIRA NETO, J.A.; MATTEINI, M.; DANTAS, E.L. (2010). Gênese e evolução dos granulitos de Cariré – NW do Domínio Ceará Central, Província Borborema. *45º Congresso Brasileiro de Geologia, Belém-PA*.

AMARAL, W.S.; SANTOS, T.J.S.; WERNICK, E.; NOGUEIRA NETO, J.A.; DANTAS, E.L.; MATTEINI, M. (2012). Granulitos de alta pressão de Cariré, Província Borborema, NE do Brasil: ambiente tectônico, condições metamórficas e U-Pb, Lu-Hf e Sm-Nd geocronologia. *Gondwana Research*, v.22, p. 883-909.

ARAUJO, C.E.G.; COSTA, F.G.; PALHETA, E.S.M.; CAVALCANTE, J.C.; VASCONCELOS, A.M.; MOURA, C.A.V. (2010). Idades 207Pb/206Pb Zircon de pré e granitóides sin-colisional do Complexo granítico-migmatítico Tamboril-Santa Quitéria, Ceará Central Domínio, Província Borborema (Nordeste do Brasil): Implicações Geodinâmicas. *In: South American Simpósio sobre Geologia Isotópica*, 7, Brasília.

ARAUJO, C.E.G.; CORDANI, U.G.; BASEI, M.A.S.; CASTRO, N.A.; SATO, K.; SPROESSER, W.M. (2012). U-Pb detrital zircon provenance of metasedimentary rocks from the Ceará Central and Médio Coreau Domains, Borborema Province, NE-Brazil: Tectonic implications for a long-lived Neoproterozoic active continental margin. *Precambrian Research*, 206-207:36-51.

ARTHAUD, M.H.; LANDIM, D.F. (1995). Relações da seqüência metassedimentar de Quixeramobim com seu embasamento. *In: Simposio de Geologia do Nordeste*, 16., Recife. Atas. Recife: SBG, v. 1, p. 125-128.

- ARTHAUD, M.H.; VASCONCELOS, A.M.; NOGUEIRA NETO, J.A.; OLIVEIRA, F.V.C.; PARENTE, C.V.; MONIÉ, P.; LIÉGEOIS, J.P.; CABY, R.; FETTER, A.H. (1998). Main Structural Features of Precambrian Domains from Ceará (NE Brazil). *In: DEGEO/UFOP – IBTA, Abstracts of the International Conference on Basement Tectonics*, 14th, Ouro Preto, p. 84-85.
- ARTHAUD, M.H. (2005). Geologia e tectônica no Domínio Ceará Central. *Qualificação ao Doutorado em Geologia*, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília (UnB), 270 pp.
- ARTHAUD, M.H.; CABY, R.; FUCK, R.A.; DANTAS, E.L.; PARENTE, C.V. (2008). Geology of the northern Borborema Province, NE Brazil and its correlation with Nigeria, NW Africa, *In: Pankhurst, R.J.; Trouw, R.A.J.; Brito Neves, B.B.; De Wit, M.J. (eds.) West Gondwana: Pre-Cenozoic Correlations Across the South Atlantic Region*. Geological Society, London, Special Publications, vol. 294, p. 49-67.
- ARTUR, A.C.; MEYER, A.P.; WERNICK, E. (2001). Características tecnológicas de granitos ornamentais: a influência da mineralogia, textura e estrutura da rocha. Dados comparativos e implicações de utilização. *In: Simpósio Brasileiro de Rochas Ornamentais, 1 / Seminário de Rochas Ornamentais do Nordeste, 2*, Salvador. Anais. Salvador: Museu Geológico da Bahia, p. 13-19.
- ASTM – American Society for Testing and Materials (1990): Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rock – D2845. Philadelphia, USA.
- ASTM – American Society for Testing and Materials, C-615 (1992). Standard Specification for Granite Dimension Stone.
- BERETKA, J.; MATHEW, P.J. (1985). Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes and by products. *Health Phys.* 48, p. 87±95.
- BONOTTO, D.M. (1990). Espectrometria gama com detector de cintilação de NaI (TI). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Júlio de Mesquita Filho, campus de Rio Claro. Apostila da disciplina Radioelementos no Ambiente. Inédito.
- BRITO NEVES, B.B. (1975). Regionalização geotectônica do Pré-Cambriano nordestino. *Tese de Doutorado*, Universidade de São Paulo, 198 pp.
- BRITO NEVES, B.B.; CORDANI, U.G. (1991). Tectonic Evolution of South America during the late Proterozoic. *Precambrian Research*, vol. 53, p. 23-40.
- BRITO NEVES, B.B.; SANTOS, E.J.; VAN SCHMUS, W.R. (2000). Tectonic History of the Borborema Province, Northeastern Brazil. *In: Tectonic Evolution of South America*, Rio de Janeiro, pp. 151-182.
- BRITO NEVES, B.B. (2003). Geotectônica do Escudo Atlântico. *In: Bizzi, L.A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R.M.; GONÇALVES, J.H. (eds.) Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*, p. 227-334. CPRM (Serviço Geológico do Brasil), Brasília, Brasil, 628 pp.
- CASTRO, N.A.; BASEI, M.A.S.; SATO, K. (2003). Nd data from Central Ceara Domain: archaean relicts, paleoproterozoic record and neoproterozoic crustal reworking. *In: South American Symposium On Isotope Geology, 4.*, Salvador. Short Papers. Salvador: CBPM/IRD, p. 161-163.

- CASTRO, N.A. (2004). Evolução geológica proterozóica da região entre Madalena e Taparuaba, domínio tectônico Ceará Central (Província Borborema). *Tese de Doutorado*, Universidade de São Paulo, Brasil.
- CAVALCANTE, J.C.; VASCONCELOS, A.M.; MEDEIROS, M.F.; PAIVA, I.P.; GOMES, F.E.M.; CAVALCANTE, S.N.; CAVALCANTE, J.E.; MELO, A.C.U.; DUARTE NETO, V.C.; BENEVIDES, H.C. (2003). Mapa Geológico do Estado do Ceará - Escala 1:500.000. Fortaleza, *Ministério das Minas e Energia Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais*.
- CHIODI FILHO, C. (2007). Balanço das Exportações e Importações de Rochas Ornamentais em 2006. São Paulo: *ABIROCHAS*, p. 20. (Informe n. 01/2007).
- CHIODI FILHO, C. (2010). Síntese das exportações brasileiras de rochas ornamentais e de revestimento em 2009, *ABIROCHAS (Associação Brasileira de Rochas Ornamentais)*, Informe 01/2010.
- COSTA, A.P. (2007). Alterabilidade e caracterização tecnológica dos gnaisses enderbíticos da porção norte do Estado do Ceará com aplicação no setor de rochas ornamentais. *Tese de doutoramento*, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista (IGCE-UNESP), Rio Claro, São Paulo, Brasil, 214 pp.
- DUARTE, R.M. (2002). Radioelementos naturais na área do projeto Rio Preto (GO). 169 f. *Tese Doutorado*, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro-SP.
- EUROPEAN COMMISSION (1999). Radiation Protection 112 Radiological protection principles concerning the natural radioactivity of building materials. Directorate-General Environment, Nuclear Safety and Civil Protection.
- FATHIVAND, A.A.; AMIDI, J. (2006). The natural radioactivity in the bricks used for the construction of the dwelling in Tehran areas of Iran. *Radiation Protection Dosimetry Advance Access*, p. 391-393.
- FETTER, A.H. (1999). U/Pb and Sm/Nd Geochronological Constraints on the Crustal Framework and Geologic History of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: Implications for the Assembly of Gondwana. Submitted to the Department of Geology and the Faculty of the Graduate School of the University of Kansas in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, Lawrence, USA. 164 pp.
- FETTER, A.H.; VAN SCHMUS, W.R.; SANTOS, T.J.S.; NOGUEIRA NETO, J.A.; ARTHAUD, M.H. (2000). U/Pb and Sm/Nd Geochronological Constraints on the Crustal Evolution and Basement Architecture of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: Implications for the Existence of the Paleoproterozoic Supercontinent "Atlantica". São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*. vol. 30, n. 1, p. 102-106.
- FETTER, A.H.; SARAIVA DOS SANTOS, T.J.; VAN SCHMUS, W.R.; HACHSPACHER, P.C.; BRITO NEVES, B.B.; ARTHAUD, M.H.; NOGUEIRA NETO, J.A.; WERNICK, E. (2003). Evidence for neoproterozoic continental arc magmatism in the Santa Quitéria Batholith of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: Implications for the assembly of west Gondwana. *Gondwana Research*, 6(2): 265-273.
- FOSSEN, H. (2010). *Structural Geology*. Cambridge University Press. 480 pp;
- FRAZÃO, E.B.; FARJALLAT, J.E.S. (1995). Características tecnológicas das principais rochas silicáticas brasileiras usadas como pedras de revestimento. In: *Congresso Internacional da Pedra Natural*, 1, Lisboa. p.47-58.

- GARCIA, M.G.M.; ARTHAUD, M.H. (2004). Caracterização de trajetória P-T em nappes brasileiras: região de Boa Viagem/Madalena – Ceará Central (NE Brasil). *Revista de Geologia*, Universidade Federal do Ceará, 17, 173-191.
- GODOY & SILVA DUARTE (2012). Caracterização Tecnológica dos Granitóides da Fácies Serra Branca, Quixeramobim – CE. *Relatório de Graduação*. Universidade Federal do Ceará (UFC).
- GOMEZ, D.P; NEVES, L.; PEREIRA, A.; NEILA, C.G. (2011). Natural radioactivity in ornamental stones: an approach to its study using stones from Iberia. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 70, p 543-547.
- HAYUMBU, P.; ZAMAN, M.B.; LUBABA, N.C.H.; MUNSANJE, S.S.; NULEYA, D. (1995). Natural radioactivity in Zambian building materials collected from Lusaka. *J. Radional. Nucl. Chem.* 199, p. 229-238.
- IAMAGUTI, A.P.S. (2001). Manual de Rochas Ornamentais para Arquitetos. *Dissertação de Mestrado*. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista (IGCE-UNESP), Rio Claro, São Paulo, 317 pp.
- ICRP 60 - International Commission on Radiological Protection (1991). Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Oxford: Pergamon Press.
- ISRM - International Society of Rock Mechanics (1977). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr.*, 15 (6): 319-368;
- ISRM - International Society of Rock Mechanics (1981). Basic geotechnical description of rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr.*, 18: 85-110.
- IVANOVICH, M.; MURRAY, A. (1992). Spectroscopic Methods. In: IVANOVICH, M.; HARMON, R.S. (Ed.) Uranium-series disequilibrium: Applications to Earth, Marine and Environmental Sciences. Oxford: Clarendon Press. cap. 5, p. 127 – 73.
- MARRE, J. (1982). Méthodes d'analyse structurale des granitoïdes. Manuel et méthodes, n.º 3, 126p., BRGM;
- MARTINS, G. (2000). Litogeoquímica e controles geocronológicos da Suíte Metamórfica Algodões-Choró. 218 f. *Dissertação de Mestrado*. Instituto de Geociências. Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- MARTINS, G.; OLIVEIRA, E.P. (2004). Arcabouço litoestrutural da suíte metamórfica Algodões-Choró, Domínio Ceará Central da Província Borborema. *Revista de Geologia*, Fortaleza, v. 17, n. 1, p. 38-51.
- NAVARRO, F.C. (1998). Granitos ornamentais: análise petrográfica na previsão do comportamento físico-mecânico. In: Congresso Uruguaya de Geologia, 2, Punta del Este. Actas. Punta del Este: Socirdad Uruguaya de Geología, p.103-107.
- NAVARRO, F.C. (2002). Caracterização Petrográfica como técnica para a precisão do comportamento físico e mecânico de granitos ornamentais. 88p. *Dissertação de Mestrado* – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista: Rio Claro.
- NOGUEIRA, J.F. (2004). Estrutura, geocronologia e alojamento dos batólitos de Quixadá, Quixeramobim e Senador Pompeu - Ceará Central. *Tese de Doutorado* – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.
- PARENTE, C.V.; ALMEIDA, A.R.; ARTHAUD, M.H. (2008). Itatira- SB.24-V-B-V, escala 1:100.000: nota explicativa integrada com Quixeramobim e Boa Viagem - Ceará:

- UFC/CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais-CPRM/Serviço Geológico do Brasil.
- RODRIGUES, E.P.; COUTINHO, J.M.V.; CHIODI FILHO, C. (1996). Petrografia microscópica: uma visão do passado, presente e futuro da rocha ornamental. *Rochas de qualidade*. São Paulo: N. 127, p. 80-84. 1996.
- RODRIGUES, E.P.; CHIODI FILHO, C.; COUTINHO, J.J.M. (1997). Importância da petrografia para a previsão do comportamento e da durabilidade de rochas ornamentais. *Rochas e Equipamentos*. Lisboa, v. 47, 2 p.
- SANTOS, T.J.S.; NOGUEIRA NETO, J.A.; FETTER, A.H.; HACKSPACHER, P.C. (2001). Petrografia e Litogeoquímica das Rochas do Embasamento Cristalino da Região de Granja, CE. *Revista de Geologia da Universidade Federal do Ceará (UFC)*, vol.14, pp.33-48.
- SANTOS, T.J.S.; SANTOS, A.A.; DANTAS, E.L.; FUCK, R.A.; PARENTE, C.V. (2003). Nd isotopes and the provenance of metasediments of the Itataia Group, Northwest Borborema Province, NE Brazil. In: *Iv South American Symposium on Isotope Geology*, 4., Salvador. Short Papers. Salvador: CBPM; IRD. p. 286-289.
- SHARAF, M.; MANSY, M.; SAYED, A.E.L.; ABBAS, E. (1999). Natural radioactivity and radon exhalation rates in building materials used in Egypt. *Radiation Measurements*, v. 31, p. 491-495.
- SIDRIM, A.C.G.; MARANHÃO, C.M.L.; PARENTE, C.V.; ANDRADE, J.F.P.; (1988). Geologia preliminar do Complexo Granítico Quixadá- Quixeramobim - CE. In: *Congr. Bras. Geol.*, 35. Belém. Anais. Belém, SBG. v. 3, p. 1024-1036.
- SILVA, L.C.; ARMSTRONG, R.; NOCE, C.M.; CARNEIRO, M.A.; PIMENTEL, M.M.; PEDROSA SOARES, A.C.; LEITE, C.A.; VIEIRA, V.S.; SILVA, M.A.; PAES, V.J.C.; CARDOSO FILHO, J.M. (2002). Reavaliação da evolução geológica em terrenos pré-cambrianos brasileiros com base em novos dados U-Pb SHRIMP, parte II: Orógeno Araçuai, Cinturão Mineiro e Cráton São Francisco Meridional. *Rev. Bras. Geociênc.*, 32:513-528.
- SILVA, F.D.O. (2010). Caracterização Tecnológica e Radiométrica de um Diabásio da região de Apuiarés. *Exame de qualificação de Mestrado em Geodinâmica e Recursos Minerais apresentado no Programa de pós graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará*, 71 pp.
- SOMLAI, J.; HORVATH, M.; KANYAR, B.; LENDVAI, Z.; NEMETH, C.S. (1998). Radiation hazard of coal slags as building material in Tatabanya Town (Hungary). *Health Phys.* 75 (6), 648–651.
- SWAKON, J.; KOZAK, K.; PASZKOWSKI, M.; GRADZINSKI, R.; ŁOSKIEWICZ, J.; MAZUR, J.; JANIĆ, M.; BOGACZ, J.; HORWACIK, T.; OLKO, P. (2004). Radon concentration in soil gas around local disjunctive tectonic zones in the Krakow area. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 78, Issue 2, pp 137 – 149.
- TORQUATO, J. R.; SIDRIM, A.C.G.; MARANHÃO, C.M.L.; PARENTE C.V.; NOGUEIRA NETO, J.A.; ANDRADE FILHO, J.F.; SOUSA, J.V.; SOUZA, M.J.N.; ARTHAUD, M.H.; ALMEIDA, A.R. (1989). Granitóides do Ceará: Região de Quixadá-Solonópole. *Revista Brasileira de Geografia*, Rio de Janeiro, v.2, n.1/2, 145p.
- TORRES, P.F.M. (2004): Aspectos geológicos e geocronológicos da região Redenção (Ce) e adjacências - contexto regional e evolutivo: Sequência Acarape e Suíte Pacatuba. *Dissertação de Mestrado*. Departamento de geologia da UFC, 188p.

- TROMPETTE, R. (1994). *Geology of Western Gondwana*. Rotterdam, A. A. Bakelma. 350 pp.
- UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (1982). Ionising radiation sources and biological effects. Report to the United Nations General Assembly.
- UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (1993). Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations, New York.
- VALLEJO, L.I.G.; FERRER, M.; ORTUÑO, L.; OTEO, C. (2002). Ingeniería Geológica. *Pearson Educación*, Madrid; ISBN: 84-205-3104-9; pp.744;
- VAN SCHMUS, W.R.; BRITO NEVES, B.B.; HACKSPACHER, P.C.; BABISNSKI, M. (1995). U/Pb and Sm/Nd geochronologic studies of the eastern Borborema Province, Northeastern Brazil: initial conclusions. *Journal South American Earth Sciences*, vol. 8, p. 267-288.
- VAN SCHMUS, W.R.; BRITO NEVES, B.B.; HACKSPACHER, P.; FETTER, A.H.; KOZUCH, M.; DANTAS, E.L.; BABINSKI, M. (1997). The Borborema Province: A collage of polycyclic crustal domains in NE Brazil. *Livro de resumos do XVII Simpósio de Geologia do Nordeste*. p. 115 -120.
- VAN SCHMUS, W.R.; BRITO NEVES, B.B.; HACKSPACHER, P.; FETTER, A.H.; KOZUCH, M.; DANTAS, E.L.; BABINSKI, M. (1998). The Borborema Province: a collage of polycyclic crustal domains in NE Brazil. In: International Conf. Basement Tectonic, 14, Ouro Preto, Extended Abstracts, p. 80-83.
- VAUCHEZ, A.; NEVES, S.; CABY, R.; CORSINI, M.; EGYDIO SILVA, M.; ARTHAUD, M.; AMARO, V. (1995). The Borborema shear zone system, NE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, vol. 8, p. 247-266.
- VIDAL, F.W.H.; SALES, F.A.C.B.; ROBERTO, F.A.C. (2005). Rochas Ornamentais e de Revestimentos In: Rochas e Minerais Industriais do Estado do Ceará/Francisco Wilson Hollanda Vidal (org.), Fernando Antônio Castelo Branco Sales (org.), Francisco Antônio da Costa Roberto (org.), José Ferreira de Sousa (org.) & Irani Clezar Mattos (org.). FORTALEZA: CETEM/ UECE/ DNPM/ FUNCAP/ SENAI.

Sites Consultados:

- <http://www.inpe.br/> - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)
- <http://www.embrapa.br/> - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA)
- <http://glcf.umd.edu/> - Global Land Cover Facility (GLCF)
- <http://www.sudene.gov.br/> - Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE)
- <http://www.sebrae.com.br/> - Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (SEBRAE)
- <http://www.abirochas.com.br/> - Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais (ABIROCHAS)
- <http://br.financas.yahoo.com/>